



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍA DE LA MADERA



Efecto del termo tratamiento en propiedades físico-mecánicas de la  
madera de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik)

Tesis

Para obtener el título de  
Ingeniero en Tecnología de la Madera

Presenta

Juan Gabriel Rivera Ramos

Director:

Raúl Espinoza Herrera  
Dr. En Ciencias y Tecnología de la Madera

Codirector:

Dr. José Cruz de León  
Dr. En Ciencias y Tecnología de la Madera

Morelia, Michoacán,

Agosto 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

*Mi agradecimiento y máximo reconocimiento a mi familia, por su dedicación para con mis actividades entorno a este trabajo de investigación, a mis directores de tesis, sinodales y asesores, por brindarme la oportunidad de desarrollar este tema bajo su tutoría, a mis profesores, por compartirme su valioso conocimiento, a mis compañeros tesistas, por su amistad y al personal administrativo de esta máxima casa de estudios por su intervención en mi proceso de titulación. A todos, muchas gracias.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	7
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	8
<b>2 ANTECEDENTES</b> .....	10
2.1 Generalidades de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm (Ya'axnik) .....	10
2.2 Propiedades físicas. ....	12
2.2.1 Anisotropía.....	12
2.2.2 Propiedades higroscópicas .....	13
2.2.3 Cambios dimensionales .....	14
2.2.4 Densidad .....	15
2.2.5 Dureza .....	16
2.3 Propiedades mecánicas .....	16
2.3.1 Compresión paralela .....	17
2.3.2 Flexión estática .....	17
2.4 Madera termo tratada.....	18
2.4.1 Propiedades afectadas por termo tratamiento en la madera .....	19
2.4.1.1 Propiedades anatómicas .....	19
2.4.1.2 Propiedades químicas .....	20
2.4.1.3 Propiedades físicas.....	22
2.4.1.4 Propiedades mecánicas .....	25
2.4.1.5 Propiedades biológicas .....	27
2.4.2 Termo tratamientos industrializados .....	27
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	30
3.1 General .....	30
3.2 Específicos.....	30
<b>4 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	31
4.1 Material de estudio .....	31
4.2 Equipo.....	32
4.3 Metodología.....	34
4.3.1 Medición de probetas .....	34
4.3.2 Determinación del peso de las probetas .....	34
4.3.3 Determinación de la densidad aparente .....	35
4.3.4 Determinación de la densidad básica .....	35
4.3.5 Determinación de contenido de humedad.....	36
4.3.6 Determinación de hinchamiento .....	36
4.3.7 Determinación de la contracción.....	38
4.3.8 Determinación de dureza Janka .....	40
4.3.9 Determinación de resistencia a extracción de clavo .....	41
4.3.10 Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra .....	42
4.3.11 Determinación de resistencia a la flexión estática .....	43

4.3.12	Termotratamiento .....	45
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>46</b>
5.1	Propiedades físicas de la madera .....	46
5.1.1	Densidad básica y aparente .....	46
5.1.2	Hinchamiento radial.....	47
5.1.3	Hinchamiento tangencial.....	48
5.1.4	Hinchamiento volumétrico .....	50
5.1.5	Anisotropía de hinchamiento .....	51
5.1.6	Coefficiente de hinchamiento.....	53
5.1.7	Contracción .....	54
5.1.8	Dureza .....	60
5.2	Propiedades mecánicas de la madera .....	64
5.2.1	Extracción del clavo .....	64
5.2.2	Compresión paralela.....	67
5.2.3	Flexión estática .....	69
5.3	Correlación de variables .....	73
5.3.1	Correlación flexión estática (MOR) y densidad aparente.....	73
5.3.2	Correlación de compresión paralela y densidad aparente.....	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>79</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Árbol de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	10
2.2	Órganos de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	11
2.3	Defectos anatomicos en madera termotratada.....	20
2.4	Pérdida de masa en tratamiento térmico de <i>Abies nordmanniana</i> .....	22
2.5	Disminución en el porcentaje de CHE .....	24
4.1	Probetas de ensayo de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	32
4.2	Horno digital para deshidratación y tratamiento térmico .....	33
4.3	Máquina universal para ensayos mecánicos .....	33
4.4	Medición de probetas .....	34
4.5	Determinación del peso de las probetas .....	35
4.6	Probetas inmersas para hinchamiento .....	38
4.7	Medición de probetas hinchamiento-contracción.....	40
4.8	Ensayo de dureza Janka.....	41
4.9	Superficie lateral ensayada .....	41
4.10	Ensayo de resistencia a extracción de clavo.....	42
4.11	Ensayo de resistencia a compresión paralela.....	43
4.12	Ensayo de resistencia a flexión estática.....	44
4.13	Probetas expuestas a alta temperatura .....	45
4.14	Probetas con termotratamiento .....	45
5.1	Hinchamiento radial en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	48
5.2	Hinchamiento tangencial en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	49
5.3	Hinchamiento volumétrico en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	51
5.4	Anisotropía de hinchamiento en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	52
5.5	Coefficiente de hinchamiento volumétrico.....	54
5.6	Contracción volumétrica máxima en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	55
5.7	Contracción radial en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	57
5.8	Contracción tangencial en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	58
5.9	Anisotropía de contracción en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	59
5.10	Dureza Janka lateral .....	61

5.11 Ensayo dureza Janka axial .....	62
5.12 Dureza Janka axial en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	63
5.13 Extracción de clavo radial de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	64
5.14 Extracción de clavo tangencial de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	66
5.15 Comparación de medianas de resistencia a compresión .....	69
5.16 MOR en flexión estática .....	70
5.17 Comparación de medias de MOE en flexión estática .....	72
5.18 Regresión entre MOR flexión estática y densidad de ensayo (testigo) .....	74
5.19 Regresión entre MOR flexión estática y densidad de ensayo (160°C) .....	74
5.20 Regresión entre MOR flexión estática y densidad de ensayo (200°C) .....	75
5.21 Regresión entre compresión paralela y densidad de ensayo (testigo) .....	76
5.22 Regresión entre compresión paralela y densidad de ensayo (160°C) .....	76
5.23 Regresión entre compresión paralela y densidad de ensayo (200°C) .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

2.1 Contenido de humedad de equilibrio.....	13
4.1 Dimensión de las probetas.....	31
5.1 Densidad básica y aparente de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	46
5.2 Hinchamiento radial de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	47
5.3 Análisis de varianza (ANOVA) de Hinchamiento radial .....	48
5.4 Hinchamiento tangencial de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	49
5.5 Análisis de varianza (ANOVA) de hinchamiento tangencial.....	50
5.6 Hinchamiento volumétrico de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	50
5.7 Análisis de varianza (ANOVA) de hinchamiento volumétrico.....	51
5.8 Anisotropía de hinchamiento.....	52
5.9 Análisis de varianza (ANOVA) de anisotropía de hinchamiento.....	53
5.10 Coeficiente de hinchamiento de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	53
5.11 Análisis de varianza (ANOVA) de coeficiente de hinchamiento.....	54
5.12 Contracción de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	55
5.13 Análisis de varianza (ANOVA) de contracción volumétrica .....	56
5.14 Análisis de varianza (ANOVA) de contracción radial .....	57
5.15 Análisis de varianza (ANOVA) de contracción tangencial.....	58
5.16 Anisotropía de contracción de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	59
5.17 Análisis de varianza (ANOVA) de anisotropía de contracción.....	59
5.18 Dureza Janka de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	60
5.19 Análisis de varianza (ANOVA) de dureza Janka lateral .....	61
5.20 Análisis de varianza (ANOVA) de dureza Janka axial .....	63
5.21 Extracción de clavo de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm .....	65
5.22 Análisis de varianza (ANOVA) de extracción de clavo radial.....	65
5.23 Análisis de varianza (ANOVA) de extracción de clavo tangencial .....	67
5.24 Resistencia a compresión paralela en <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	68
5.25 Análisis Kruskal-Wallis ANOVA por rangos .....	68
5.26 Comparación por parejas no paramétricas (Post-hoc).....	68
5.27 Diferencias por pares de filas y significación.....	69
5.28 Análisis de varianza (ANOVA) de MOR en flexión estática.....	70
5.29 Flexión estática de <i>Vitex gaumeri</i> Greenm.....	71

## RESUMEN

En la modificación de las propiedades de la madera se emplean tratamientos térmicos que, al no utilizar agentes químicos, son considerados respetuosos del medio ambiente. La estabilidad dimensional, el contenido de humedad en equilibrio, la resistencia a la pudrición y los cambios en su coloración, son propiedades físicas que suelen mejorar con este método, no obstante la influencia sobre las propiedades mecánicas no siempre es en beneficio de éstas. En el presente estudio se investiga cómo el termotratamiento a 160 y 200°C en un tiempo de 2.5 horas afecta las propiedades físico-mecánicas de madera de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik). Los resultados demuestran que la modificación térmica causó disminución en la humedad en equilibrio y la densidad aparente, así mismo menor contracción radial y volumétrica, los hinchamientos radial, tangencial y volumétrico también disminuyeron. Por otra parte, se incrementó la dureza axial, la resistencia a compresión paralela hasta en un 24% y el MOE en flexión estática hasta un 18.7%. En extracción de clavo tangencial la resistencia disminuyó y de igual forma el MOR en flexión estática, este último a 200°C únicamente. De acuerdo a estos resultados la madera sufrió modificación térmica y adquirió propiedades que pueden ser aprovechadas en nuevas aplicaciones.

## ABSTRACT

In the modification of the properties of wood are used heat treatments, when not using chemical agents, are considered environmentally friendly. Dimensional stability, moisture content in balance, the resistance to attack by micro-organisms and changes in its coloring, are physical properties that tend to improve with this method, however the influence on the mechanical properties is not always for the benefit of these. In the present study investigates how the heat-treatment at 160 and 200 °C in a time of 2.5 hours affects the physical-mechanical properties of wood of *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik). The results show that the changes thermal caused decrease in humidity in balance and the apparent density, well same less shrinkage radial and volumetric, the swollen radial, tangential and volumetric also decreased. On the other hand, increased the hardness axial, the resistance to compression parallel up to 24% and MOE in flexion static up to 18.7 %. In removal of nail tangential resistance decreased and in the same way, the MOR in flexion static, the latter to 200 °C only. According to these results wood suffered modification thermal and acquired properties that can be exploited in new applications.

**Palabras clave:** Termotratamiento, propiedades físico-mecánicas, *Vitex gaumeri* Greenm.

## 1. INTRODUCCIÓN

*Vitex gaumeri* Greenm, conocida en México comúnmente como Crucillo o Ya'axnik, forma parte de las especies comunes tropicales de regeneración natural en el sureste mexicano, (CONABIO 2012), en la península de Yucatán no se considera especie maderable comercial, (Vester *et al.* 2005), desaprovechando así el potencial de aplicaciones en la industria forestal nacional, además de desalentar su adecuado manejo y la protección en su hábitat natural como recurso forestal (UICN, 2013; Inaturalist, 2013), no obstante su aprovechamiento integral exige, entre otras cosas, el conocimiento de sus características tecnológicas.

La madera como material de ingeniería requiere valores mínimos de resistencia, el comportamiento que presenta ante procesos elásticos, plásticos y de ruptura definen su calidad mecánica, los valores de sus propiedades físico-mecánicas determinados a partir de material sin defectos son utilizados como referencia para madera bajo condiciones reales de servicio (Fernández *et al.* 1983; Hernández, 2010; GDF, 2004; AFPS, 2004; Standards Australia, 2010) o como objetivo en plantaciones industriales gestionadas bajo regímenes silvícolas de madera maciza (Montagu *et al.* 2003; Nolan *et al.* 2005). Las propiedades naturales de la madera pueden ser modificadas incorporando procesos industriales que incrementen su capacidad de respuesta ante condiciones adversas de servicio.

Los tratamientos térmicos constituyen uno de los métodos más eficaces de modificación para madera (Homan & Jorissen, 2004). Importantes cambios se producen en sus propiedades durante el proceso a altas temperaturas (150°C-280°C) que repercuten en el mejoramiento de propiedades (Boonstra *et al.* 2007), tales como la disminución de su higroscopicidad, mayor estabilidad dimensional, durabilidad biológica y en su estética al adquirir nuevas tonalidades en su coloración (Syrjänen & Kestopuu, 2001). Sin embargo, los efectos de las altas temperaturas sobre las propiedades mecánicas son generalmente en detrimento de estas y mucho dependen de la temperatura máxima alcanzada (Boonstra *et al.* 2007; Calonego *et al.* 2011; Hermoso *et al.* 2013; FTA, 2003; Militz & Tjeerdsma, 2001; Vernois, 2001; Rapp & Sailer, 2001), debido a estos cambios la madera termo tratada es considerada como un nuevo material con variedad de aplicaciones y propiedades (Vos, 2001).

La modificación térmica de la madera es reconocida cada vez más como una técnica respetuosa del medio ambiente para mejorar ciertas propiedades sin utilizar agentes químicos (Altgen *et al.* 2012; Pelaez *et al.* 2013), razón importante a considerar en el desarrollo de investigaciones en este sentido.

El conocimiento de propiedades tecnológicas del *Vitex gaumeri* a través del presente estudio complementará información requerida para el uso potencial de esta especie.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Generalidades de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik)

**Nombre científico:** *Vitex gaumeri* Greenm

**Nombre común:** Ya'axnik, Yashcabté, Nichté, Crucillo

**Familia:** Verbeneaceae

**Género:** Vitex

**Especie:** Gaumeri Greenm

**Origen:** Desconocido

El *Vitex gaumeri* Greenm alcanza una altura promedio por arriba de los 30 metros (CONABIO, 2012), otros autores consideran este árbol (fig.2.1) con alturas máximas de 33 metros y diámetros del fuste entre 61 y 91 cm (Chudnoff, 1984), su fuste presenta una forma cilíndrica con curvaturas constantes y pocas ocasiones bifurcado, el interior del fuste es hueco y presenta nudos de ramificaciones a escasos centímetros de distancia, de ramificación solo superior, copa semi-redonda (Hernández, 2014), intolerante a la sombra y por tal motivo con mayor desarrollo que otras especies (Hernández & Cruz, 2013).



Figura 2.1 Árbol de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik) (Hernández, 2014)

Sus hojas son elípticas de 3 a 5 palmeadas (fig. 2.2), con un peciolo cada una unidas a la rama, con borde liso y nervaduras pinnadas, el haz de la hoja es verde oscuro pubescente y el envés de la hoja es verde grisáceo con apariencia lanosa (Hernández & Cruz, 2013), las flores se encuentran en racimos (fig. 2.2) de 3 o 5 de forma palmeada calificadas como plurifloras (Hernández, 2014).

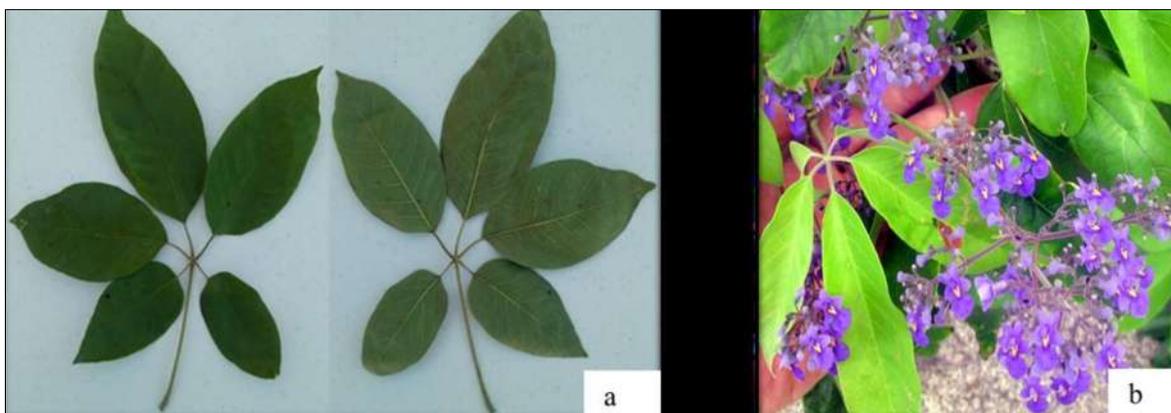


Figura 2.2 Órganos de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik) a) Hojas: haz y envés, b) Inflorescencias y flor (Hernández, 2014)

El *Vitex gaumeri* constituye uno de los recursos forestales de la península de Yucatán, ampliamente distribuida de manera natural en esta zona, utilizada moderadamente en ebanistería (Martínez *et al.* 2013), es una especie tropical típica de la selva alta subperennifolia, mediana subperennifolia y subcaducifolia (CONABIO, 2012), con distribución geográfica en centro América, desde México hasta Nicaragua (CICY, 2013).

La madera presenta un color castaño pálido, casi blanco con vetas castaño oscuro, no tiene olor ni sabor característicos, presenta brillo alto, vetado suave, textura mediana heterogénea e hilo entrecruzado; anillos de crecimiento poco marcados. Los poros se ven a simple vista, los rayos y el parénquima son visibles solo con lupa, la porosidad que presenta es difusa, los poros son solitarios y múltiples radiales de 2 a 4, son numerosos con valor de su media de 14 por mm<sup>2</sup> de diámetro tangencial pequeño con valor de su media de 89μ, la longitud de los elementos vasculares es mediana con valor de su media de 417μ, presenta puntuaciones areoladas alternas y placa perforada simple. El parénquima leñoso es paratraqueal vasicéntrico, los rayos son uniseriados y poliseriados heterogéneos, son numerosos con valor de su media de 8 por mm, los rayos poliseriados son bajos en cuanto a su altura con valor de

su media de 344 $\mu$ . Las fibras son de tipo libriformes en su mayoría y algunos fibrotraqueidas, clasificadas como de longitud larga con valor de su media de 1,742 $\mu$ , de diámetro tangencial mediano con valor de su media de 25 $\mu$  y el grosor de las paredes en clasificado como delgado con valor de su media de 5 $\mu$ . El parénquima presenta sílice (Pérez *et al.* 1980).

## **2.2 Propiedades físicas**

Las propiedades físicas de la madera definen gran parte de sus características tecnológicas, el estudio de estas resulta indispensable para identificar si es o no un material para un uso determinado, su estructura naturalmente heterogénea alberga condiciones únicas según la especie y condiciones durante su formación. Fernández *et al.* (1983) señalan que dichas propiedades físicas dependen fundamentalmente de la cantidad del elemento básico y la composición química que forma las paredes celulares, así como de la disposición y orientación de estos mismos elementos.

### **2.2.1 Anisotropía**

La constitución anatómica de la madera resulta en la disposición longitudinal y transversal de sus elementos, así mismo en una desigual concentración y conformación de estos a través de las capas anuales de crecimiento, esta particularidad le da el carácter anisótropo a la madera, adquiriendo propiedades físicas y mecánicas según la dirección. Para fines prácticos en madera dimensionada se establecen tres direcciones que se idealizan en un sistema cartesiano de coordenadas (perpendiculares entre sí) caracterizándola como un material ortótropo, el eje longitudinal y paralelo al eje medular del árbol, el eje tangencial paralelo a los anillos anuales de crecimiento y el eje radial perpendicular a los mismos (COFAN, 1994).

### 2.2.2 Propiedades Higroscópicas

La madera como un material sólido poroso, es capaz de interactuar con las moléculas de agua y las propiedades de esta, a través de fuerzas del orden electrostáticas, por oclusión y capilares, respectivamente en agua de constitución de los elementos químicos de la madera, agua de impregnación en las paredes celulares (PSF) y agua de saturación dentro de los lúmenes celulares; tal condición establece un equilibrio dinámico entre el contenido de humedad de la madera y las variables de temperatura y humedad relativa ambiente, manifestándose como un equilibrio higrotérmico durante la absorción y adsorción del vapor de agua y la liberación de este a la atmósfera a partir de la madera húmeda. La COFAN (1994) nos presenta una relación entre la temperatura y humedad relativa de aire, con el correspondiente contenido de humedad de equilibrio en la madera (tabla 2.1)

Tabla 2.1 Contenido de humedad de equilibrio (CHE) de la madera, para varias condiciones de temperatura (°C) y humedad relativa (HR) del aire (COFAN, 1994).

HR (%)	TEMPERATURA			
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
10	2.6	2.5	2.3	2.1
20	4.6	4.4	4.2	3.9
30	6.2	6.0	5.8	5.5
40	7.8	7.7	7.2	7.0
50	9.3	9.0	8.7	8.4
60	11.1	10.8	10.2	10.0
70	13.4	13.2	12.5	12.0
80	16.4	16.2	15.8	15.2
90	20.5	20.0	19.7	18.7

La variación del contenido de humedad en la madera produce principalmente cambios en sus propiedades físicas (densidad, estabilidad dimensional, térmicas, acústicas y eléctricas), la resistencia al ataque de microorganismos y afecta la mayoría de propiedades mecánicas incrementando el valor de estas con la disminución de contenido de humedad como lo muestra Gerhards (1982) para CH del 12% al 6%, incrementos en el valor de distintas propiedades mecánicas del 8% hasta el 35%, no así en su tenacidad. El aumento del contenido

de humedad en la madera tiene como consecuencia plastificar las propiedades de resistencia mecánica (Hernández, 2010).

Sobre los cambios dimensionales y el reblandecimiento de las células que se manifiestan finalmente en la resistencia mecánica Grotkopp (2006), publicó investigaciones realizadas a nivel celular y señala que corresponden a cambios en la orientación y al alargamiento de los cristales de celulosa.

### **2.2.3 Cambios dimensionales**

En la madera se presentan cambios dimensionales principalmente por variaciones en el contenido de humedad, variaciones térmicas y por procesos mecánicos de densificación.

Las paredes celulares en la madera tienen la propiedad física de contraerse a partir del punto en que estas desalojan humedad (intervalo del PSF hasta 0% de C.H.), este fenómeno se refleja en contracciones de los diferentes ejes de la madera, el Laboratorio de Productos Forestales de USA (FPL, 2010) reporta valores máximos del 2% en sentido longitudinal, 7.7% en eje radial, 12.7% para el eje tangencial y del 19.2% en contracción volumétrica, estas diferencias de los valores pueden provocar distorsiones en los planos geométricos de las piezas de madera. La variación en un grado del CH menor o igual al PSF tendrá una relación casi lineal con la contracción o el hinchamiento, de aquí la posibilidad de establecer un coeficiente de contracción lineal y de hinchamiento (relación de hinchamiento) para cada especie. La relación de hinchamiento resulta de gran utilidad para una adecuada asignación de madera puesta en condiciones reales de servicio (Talavera *et al.* 2002).

Los cambios dimensionales por variación térmica en la madera anhidra son positivos, es decir, se expande con el aumento de temperatura y se contrae con la disminución de esta. Sin embargo, cuando la madera contiene humedad y es sometida a aumentos de temperatura, los efectos de contracción volumétrica por pérdida de humedad serán mayores que la dilatación por almacenamiento de calor; Es posible establecer un coeficiente de dilatación por cada grado de temperatura, dicho coeficiente será proporcional al peso específico cuando se trate del sentido transversal de la madera, generalmente de 5 a 10 veces más que el valor en sentido

longitudinal. Así se considera un coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha$ ) longitudinal del  $3.6 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  y transversal de  $64 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  (FPL, 2010).

Los procesos mecánicos de compresión en la madera, provocan cambios dimensionales en esta, con la densificación de sus elementos estructurales amorfos. El empleo de altas temperaturas facilita las condiciones en que lignina, hemicelulosa y celulosa amorfa alcanzan su temperatura de transición vítrea  $T_g$  o de relajación, plastificándose y con esto deformándose más fácilmente al ser comprimidos (Sandberg & Navi, 2007). Con cargas de  $70.3 \text{ kg/cm}^2$  se han obtenido gravedades específicas del 1.35, comúnmente a estas maderas se les conoce como Staypak o Compreg Wood (FPL, 2010).

#### **2.2.4 Densidad**

La densidad nos indica la cantidad de masa por unidad de volumen de un material, en la madera la masa la encontramos representada por el material leñoso y el contenido de las cavidades del mismo. La densidad en la madera es afectada por el contenido de humedad, extractivos, grosor de las paredes celulares, proporción celular y por la posición de la pieza en el tronco del árbol. Kollmann & Côté (1968) reportan una densidad real de  $1.5 \text{ g/cm}^3$  para la pared celular de la madera, esto significa que especies con paredes celulares gruesas y menos cavidades tendrán mayor densidad que las de paredes delgadas o con más espacios vacíos, así mismo una madera con gran proporción de madera tardía o material fibroso tendrá mayor masa por unidad de volumen, además de variar con la especie y condiciones de crecimiento, generalmente este tipo de tejidos se encuentran concentrados hacia la parte inferior y exterior del tronco del árbol. Los extractivos en la madera le darán una densidad aparente, que registrará mayores valores, de igual forma que la humedad contenida en sus cavidades, por este motivo la densidad debe ser referida a un contenido de humedad específico. Las densidades referidas o relacionadas más comúnmente utilizadas son: Densidad Básica (peso específico) que relaciona peso anhidro con volumen verde y Densidad Normal referida a un peso y volumen al 12% de CH (COFAN, 1994).

La densidad tiene una importante relación con distintas propiedades en la madera, generalmente a mayor densidad mayor será la resistencia mecánica, más difícil su maquinado, su secado y preservación, menos biodegradable, mayor conductividad térmica y mayor conductividad acústica (FPL, 2010).

### **2.2.5 Dureza**

La capacidad de que los elementos constitutivos en una madera se mantengan rígidos (en su conjunto) es entendida como la dureza de la madera. Para fines prácticos esta propiedad física es interpretada como la resistencia que presenta la madera a una acción externa de abrasión, desgaste, penetración y/o compresión (Bárcenas *et al.* 2014),

En un estudio de dureza Janka lateral y axial para 23 especies Bárcenas *et. al.* (2014) encuentran con efecto significativo el volumen de los vasos y células de parénquima (con poca área de pared celular y diámetros mayores que los de las fibras y los radios), los cuales representan la proporción de tejidos más blandos de la madera, de manera que su abundancia afecta directamente, no obstante, la variable de mayor influencia encontrada fue el volumen total de paredes celulares (densidad básica) por ser más gruesas que las de los elementos de vaso y las células de parénquima.

### **2.3 Propiedades mecánicas**

Cuando una fuerza externa es aplicada a la madera, esta tiende a deformarse, sin embargo, las propiedades mecánicas de esta son las que le permiten realizar un esfuerzo resistente a tal deformación, la relación entre este esfuerzo y la deformación define el comportamiento elástico, plástico y de ruptura durante las distintas sollicitaciones mecánicas.

La resistencia mecánica de la madera está relacionada directamente con su estructura anatómica y su composición química, caracterizando sus propiedades mecánicas de acuerdo a: tipo y función de células, el acomodo de estas en el plano leñoso, el comportamiento mecánico de las cadenas celulósicas, hemicelulósicas, y la rigidez proporcionada por la lignina; Además

de esto, la resistencia mecánica de la madera en condiciones reales de servicio estará afectada por factores como: humedad, temperatura, defectos, dirección del plano leñoso, velocidad y tipo de sollicitación mecánica (Kollmann & Coté, 1968; Standars Australia, 2010; American Forest & Paper Association, 2004 ).

La condición de la madera dimensionada como material ortótropo obliga a distinguir tres juegos de propiedades mecánicas. Sin embargo, los valores entre la dirección tangencial y radial son muy cercanos, razón por la cual únicamente se toma un juego para resistencia paralela a la fibra y uno para resistencia perpendicular a la fibra.

Investigaciones realizadas a las propiedades mecánicas del *Vitex gaumeri* han sido efectuadas en probetas de contenido de humedad por arriba del punto de saturación de la fibra (PSF) por Torelli (1982) quien clasifica su resistencia a flexión y compresión paralela como alta. Chudnoff (1984) reporta valores para el género *Vitex* en su conjunto sin especificar la especie.

### **2.3.1 Compresión paralela**

Se considera un buen índice para evaluar el comportamiento mecánico de la madera, con valores de resistencia entre los 100 y 1600 kg/cm<sup>2</sup>, aquí los elementos constitutivos son comprimidos, esta acción mecánica presenta la falla por fenómenos de pandeo en las fibras individuales sometidas a compresión (Fernandez *et al.*, 1983).

### **2.3.2 Flexión estática**

La resistencia a la flexión se presenta cuando la carga es aplicada en sentido perpendicular a las fibras y la pieza de madera se encuentra apoyada en sus extremos, los esfuerzos aquí realizados son de compresión, tensión y cortante, salvo en algunos casos de latifoliadas duras. En general las fibras comprimidas presentan la falla y después las fibras tensionadas (en donde es más visible), es poco común que se presente por fibras en cizalladura (ubicadas en los tercios extremos) a menos que la madera presente defectos (Fernández *et al.*, 1983). La madera a flexión normalmente manifiesta su tenacidad cuando la relación esfuerzo

deformación deja de ser lineal, previo al momento de la fractura, esto conlleva a una sobre estimación de resistencia máxima (sin deformación) al asignar el Módulo de Rotura (MOR), sin embargo, el MOR es aceptado como tal (FPL, 2010). Los valores para esta acción mecánica se encuentran entre los 300 a 2100 kg/cm<sup>2</sup> (Fernandez *et al.* 1983).

## **2.4 Madera termotratada**

Resulta de la exposición de la madera a temperaturas elevadas de entre 160-260 °C, por periodos preestablecidos, en condiciones de atmosferas reducidas o no en oxígeno, con ambientes secos o húmedos. Presentan cambios permanentes los elementos estructurales de su pared celular, la degradación térmica de sus polímeros en zonas amorfas principalmente disminuye los sitios más reactivos, limitando la higroscopicidad del material. Propiedades físicas y mecánicas son alteradas en esta madera como su reducido contenido de humedad de equilibrio, mayor estabilidad dimensional, menos biodegradable, su pérdida de masa, cambio de color, aumento en su fragilidad y en general menos resistente a esfuerzos mecánicos (Voss, 2001; Altgen *et al.* 2012; Esteves & Pereira, 2009).

Los primeros trabajos en esta materia se realizaron (Stamm & Hansen, 1937; citados por Fernandez *et al.*, 2014) en pino blanco americano (*Pinus strobus*), donde se estudió el efecto de temperatura de calentamiento utilizando diferentes atmosferas gaseosas, y se concluyó que la estabilidad dimensional es directamente proporcional a la temperatura y tiempo de calentamiento.

Durante el termotratamiento sucede el intercambio entre calor y masa, generándose un sistema que tendrá efectos sobre la madera, la magnitud de dichos efectos dependerá de las variables del proceso como las descritas por Syrjänen & Kestopuu (2001) y puntualizados a continuación:

- La temperatura máxima y la duración máxima del periodo de tratamiento de calor real
- El gradiente de temperatura
- El uso y la cantidad de vapor de agua

- El proceso de secado en horno previo
- La especie de madera y sus propiedades características.

## **2.4.1 Propiedades afectadas por termo tratamiento en la madera**

### **2.4.1.1 Propiedades anatómicas**

La estructura anatómica de la madera es afectada por tratamientos térmicos, en mayor o menor medida por colapsos en: parénquima, células epiteliales de los rayos o canales resiníferos, paredes de los vasos, traqueidas de madera temprana y/o de la interfaz entre temprana y tardía, traqueidas vasicentricas y deformación en las fibras libriformes cercanas a los vasos; el resultado de las rupturas o deformaciones en la estructura anatómica es la formación de micro grietas perpendiculares o paralelas a la dirección de la fibra (Fig.2.4), estas micro grietas funcionan como punto de partida en la formación de grietas y podrían contribuir a la fractura abrupta durante esfuerzos mecánicos como el de flexión (Altgen *et al.* 2012; Awoyemi & Jones, 2011; Boonstra *et al.* 2006).

Los cambios producidos en albura o duramen pueden ocurrir con distinta intensidad, dependiendo de la especie y las condiciones del tratamiento. Sin embargo, esto es relacionado más directamente con la composición química de la albura y duramen (Metsä, 2011), así mismo entre especies de latifoliadas y coníferas, los resultados del tratamiento térmico son distintos, debido a las diferencias en su estructura celular, generalmente las latifoliadas son modificadas a menor temperatura y tiempo (Syrjänen & Kestopuu, 2001; FTA, 2003).

En la figura 2.3 se muestra Defectos en madera modificada térmicamente observada mediante microscopía de luz. (Altegen *et al.* 2012).

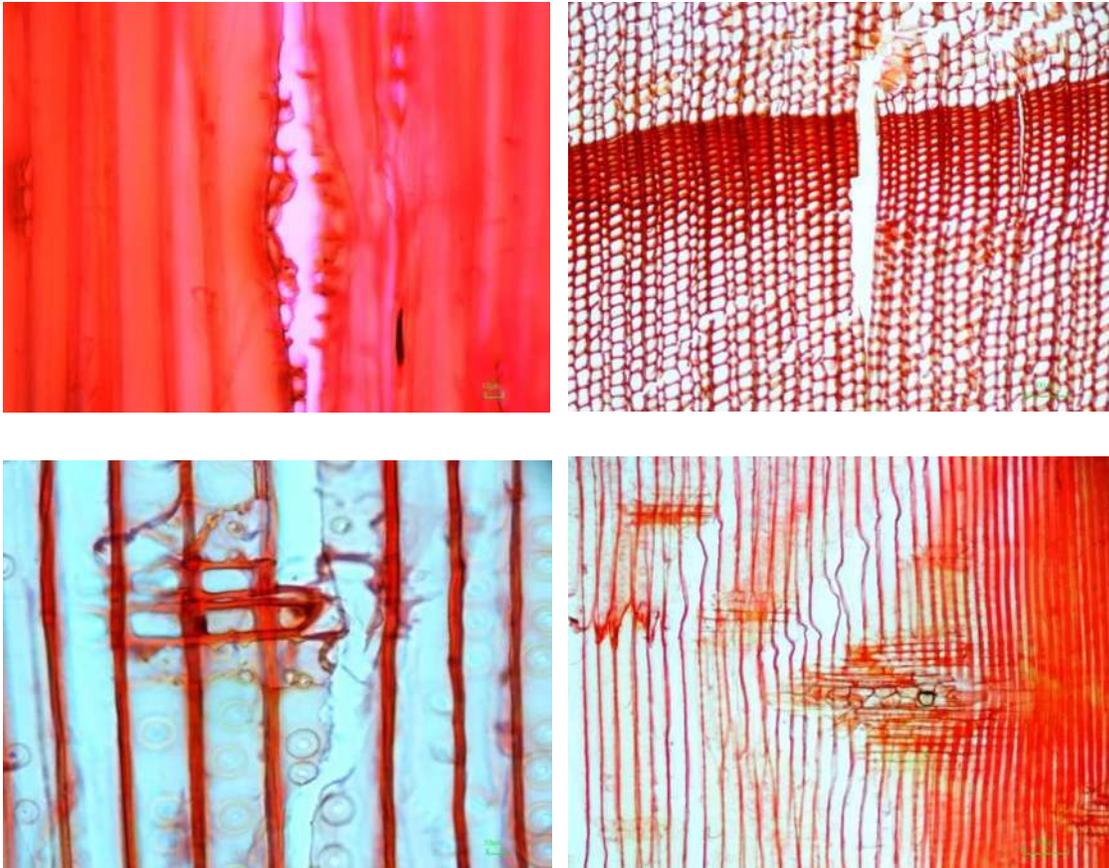


Figura 2.3: Defectos anatomicos en madera termotratada. Arriba a la izquierda: rayo fusiforme distorsionado en una sección tangencial de abeto de Noruega; arriba a la derecha: grietas radiales a lo largo de un rayo sobre una sección transversal de abeto de Noruega; Abajo a la izquierda: grieta longitudinal dentro de una traqueida de madera temprana en una sección radial de pino escocés; Abajo a la derecha: deformación de paredes de traqueida de madera temprana en una sección radial de pino escocés (Altgen *et al.* 2012).

#### 2.4.1.2 Propiedades químicas

La madera sometida a altas temperaturas experimenta procesos químicos que modifican las propiedades de sus elementos constitutivos, Fengel & Wegener (1989), citados por Källander & Landel (2007), los clasifican en proceso de hidrólisis, deshidratación y oxidación.

Durante la hidrólisis las moléculas de agua que se unen al polisacárido provocan el rompimiento de este teniendo como resultado sacáridos más cortos no volátiles, así mismo la formación de ácido acético, fórmico y carbónico, estos ácidos funcionan como catalizadores

acelerando la hidrólisis al provocar la ruptura de más sacáridos y con esto la reducción del grado de polimerización de los hidratos de carbono, lo que significa degradación en la columna vertebral en la hemicelulosa y pérdida de resistencia (Boonstra *et al.* 2007; Militz & Tjeerdsma, 2001), no obstante estos ácidos orgánicos son altamente solubles en agua y parte de estos se evaporan junto a la humedad de la madera (Källander & Landel, 2007), además, la degradación de las cadenas laterales de hemicelulosa dentro de la matriz lignohemicelulósica, se cree interrumpen la capacidad de carga compartida disminuyendo la resistencia del material (LeVan *et al.* 1990). En general, se reconoce a la hidrólisis como el proceso de mayor degradación térmica durante el tratamiento (Johansson, 2008; Källander & Landel, 2007). En la deshidratación a altas temperaturas, el agua liberada de la madera se produce durante el proceso y con esto el rompimiento del polisacárido. La oxidación por su parte en el termotratamiento conduce al aumento del peso de la molécula (Källander & Landel, 2007).

La degradación térmica es distinta en los componentes principales de la madera, la hemicelulosa tiene menor capacidad de resistir el calor degradándose a menor temperatura y más rápido respecto de la celulosa y más aún de la lignina, el rompimiento de los enlaces secundarios entre hemicelulosa-celulosa y los enlaces covalentes entre hemicelulosa-lignina, alteran la capacidad de intercambio de carga en su respectiva matriz, así como al degradarse la hemicelulosa disminuye la concentración de grupos hidroxilo de adsorción y el material susceptible a hongos. En la celulosa, la reducción del grado de polimerización da un aumento relativo en la cantidad de celulosa cristalina, debido a la degradación y/o cristalización de celulosa amorfa, afectando las propiedades mecánicas. La lignina, que es más estable térmicamente, se cree experimenta reacciones de re polimerización, lo que da lugar a nuevos polímeros de lignina y a un aumento en la reticulación entre esta y los polímeros, dando mayor resistencia de la lamela media para mejorar la resistencia de la pared celular (Boonstra *et al.* 2007).

### 2.4.1.3 Propiedades físicas

#### ➤ Pérdida de masa

La degradación térmica en los componentes de la madera, principalmente de su hemicelulosa, generalmente da origen a pérdida de masa durante el tratamiento. Esta pérdida dependerá de las condiciones del proceso y de la especie tratada, siendo mayor esta pérdida a más temperatura, a mayor tiempo de exposición y a una humedad relativa más elevada o en especies con mayor cantidad de hemicelulosa como las latifoliadas. El grado de pérdida de masa puede funcionar como un indicador de calidad para cada especie ya que se ha observado la disminución de resistencia mecánica con el aumento en la pérdida de esta (Borrega & Kärenlampi, 2008; Alen *et al.* 2002, Estebes *et al.* 2008). Para madera de *Pinus sylvestris* y *Betula pendula* (Zaman, & Kotilainen, 2000) encuentran pérdidas de masa de hasta 15.2 %. En la figura 2.4 se observa el incremento en la pérdida conforme aumenta la temperatura y el tiempo de exposición, estos resultados fueron obtenidos por Gunduz *et al.* (2010) en madera de *Abies nordmanniana*.

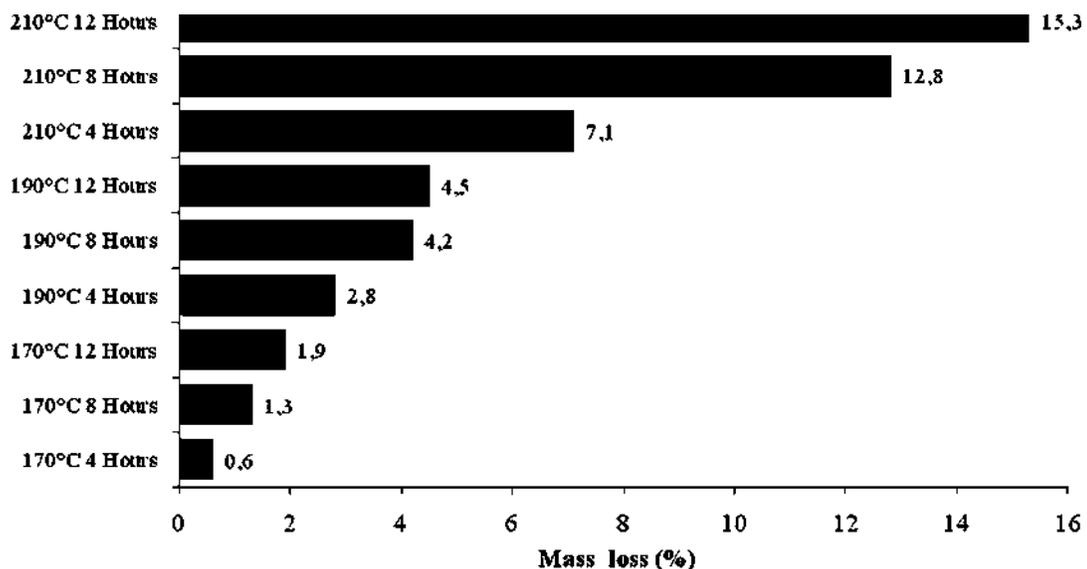


Fig. 2.4 La pérdida de masa en el tratamiento térmico de madera de *Abies nordmanniana* en diversos tiempos y temperaturas (Gunduz *et al.* 2010).

### ➤ **Higroscopicidad y humedad de equilibrio**

La capacidad higroscópica de la madera generalmente es disminuida conforme al aumento de la temperatura y el tiempo de exposición durante el tratamiento térmico, además de estas variables también influye la especie y el tipo de tratamiento (Akyildiz & Ates, 2008; Juodeikienė, 2013; Bekhta & Niemz, 2003 ; Rapp & Sailer, 2001 ), esta disminución higroscópica es atribuida a la reducción de los grupos más hidrófilos (hidroxilo de la hemicelulosa), mayor inaccesibilidad de los grupos OH por las moléculas de agua debido al aumento de celulosa cristalina, por reacciones de poli condensación en la lignina (Boonstra *et al.* 2006) y por la pérdida de sustancias (Akyildiz & Ates, 2008); La disminución del contenido de humedad de equilibrio en la madera es reflejo directo de la disminución de higroscopicidad. Sin embargo, se ha observado que la madera tratada térmicamente presenta cierta porosidad y al ser sumergida puede absorber más del 20% de agua, la cual puede perder nuevamente de manera fácil al ser secada (Vernois, 2001), ya que la mayor parte de esta agua no es alojada en su pared celular; para madera tratada térmicamente y expuesta a diferentes condiciones de humedad relativa Kamdem *et al.* (2002) reportan una disminución en la humedad de equilibrio más marcado para humedades relativas más altas, esto respecto de madera sin tratar. La disminución de la humedad de equilibrio se reporta de entre el 2.9-50% (Juodeikienė, 2013; Järmsä & Viitaniemi, 2001; Akyildiz & Ates, 2008). En la figura 2.5 Akyildiz & Ates, (2008) muestran una relación de temperatura aplicada, tiempo y la disminución de humedad de equilibrio.

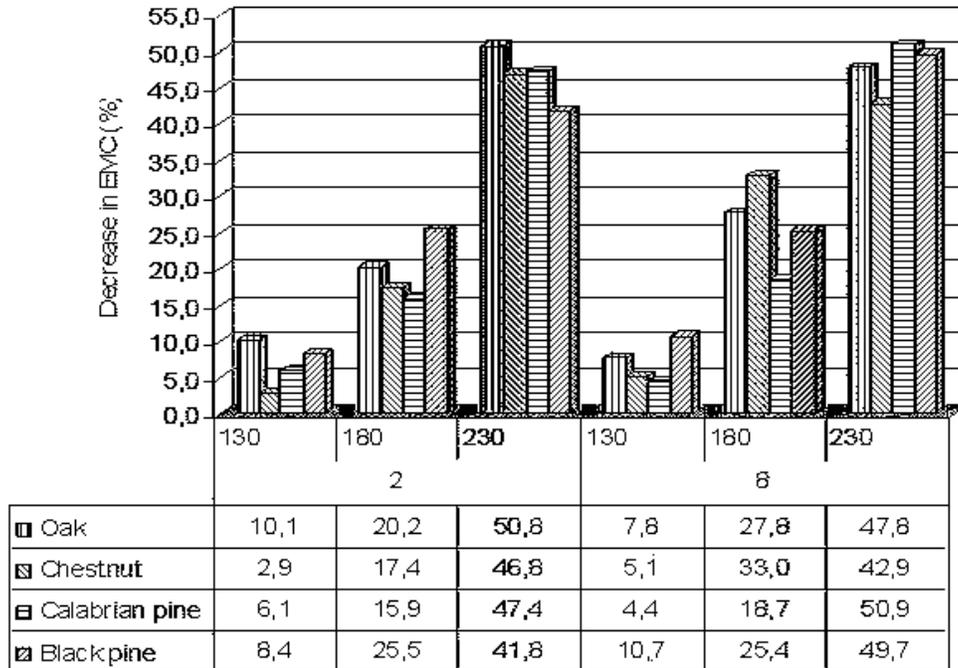


Fig.2.5 Disminución en porcentaje del CHE en función del tiempo y la temperatura aplicada (Akyildiz & Ates, 2008).

### ➤ Estabilidad dimensional

La reducción de la capacidad higroscópica en madera con tratamiento térmico tiene como consecuencia cambios dimensionales de menor magnitud, y por lo tanto, una mayor estabilidad dimensional ante los cambios de humedad en el ambiente. Es en el sentido tangencial donde se han observado mayores cambios en contracción e hinchamiento causando menores tensiones internas al reducirse, la diferencia entre éste y el sentido radial. La estabilidad dimensional será mayor a más temperatura y tiempo durante el proceso de tratamiento pero la magnitud de este cambio estará determinada por la especie tratada (Militz & Tjeerdsma., 2001; Esteves & Pereira, 2009). Según Esteves & Pereira (2009) es común utilizar un índice de eficacia para cuantificar el mejoramiento en estabilidad dimensional “ASE” (Antishrinking efficiency), el cual representa la diferencia de hinchamiento entre madera tratada y no tratada, como ejemplo un ASE65% se refiere al mejoramiento de una madera tratada respecto de la no tratada, los valores de ASE presentados por este mismo autor

se encuentran entre el 10% y 50%. Sin embargo otros autores reportan reducciones en contracción e hinchamiento entre el 50% y 90% (Järmsä & Viitaniemi, 2001).

#### ➤ **Color**

Cuando la madera es expuesta a altas temperaturas, ésta presenta cambios en su color, esto se asocia a los cambios en la pared celular y los extractivos (Gunduz *et al.* 2010; Chen *et al.* 2012), Regularmente los cambios de coloración son más notorios en madera de latifoliadas (Esteves *et al.* 2008). Garibay & Espinoza (2014) reportan que la tendencia al oscurecimiento tiene un efecto mayor a más temperatura y más tiempo de aplicación. Mitsui *et al.* (2004) por su parte concluyen que con el aumento de humedad relativa en el tratamiento el cambio en el color es mayor. Además de la contribución estética de estos cambios, se observa una relación con las propiedades mecánicas o la pérdida de masa. (Esteves *et al.* 2008; Gunduz *et al.* 2010; Bekhta & Niemz, 2003; Johansson, 2006).

#### **2.4.1.4 Propiedades mecánicas**

La madera tratada térmicamente puede afectar en sus propiedades mecánicas, presentando disminuciones en la resistencia a flexión, flexión dinámica (impacto), tensión, cortante, dureza, entre otras. Sin embargo, bajo condiciones específicas se han registrado incrementos en propiedades como resistencia a compresión o en el módulo de elasticidad (MOE) en flexión (Esteves & Pereira, 2009). Boonstra *et al.* (2007) asocian estos cambios a los componentes estructurales amorfos (hemicelulosa y lignina) y semicristalinos (regiones amorfas en la celulosa) que al sufrir degradación térmica dan como resultado un material con propiedades mecánicas distintas y que se caracteriza por incrementar su fragilidad, además de la degradación térmica, estos mismos autores sugieren que la interacción entre componentes estructurales de la madera pueden ser distintos posterior al tratamiento debido al fenómeno termoplástico, lo que finalmente afectará las propiedades mecánicas. Las propiedades termoplásticas son manifiestas durante el tratamiento hidrotérmico cuando los polímeros amorfos y semicristalinos sufren ablandamiento, este fenómeno está relacionado con la

temperatura de transición vítrea (Tg) o de relajación, esta temperatura marca la frontera entre dos estados fundamentales de un polímero amorfo, el vítreo (duro y frágil) y el amorfo (suave y gomoso), la acción térmica conduce a la Tg de lignina (140-190°C), hemicelulosa (150-220°C) y celulosa (200-250°C). Sin embargo, en presencia de humedad (hidrotermólisis) la Tg es disminuida plastificándose a menor temperatura (Sandberg & Navi, 2007). De esta manera las condiciones del tratamiento, así como, la especie tratada definen el tipo y la magnitud de los cambios. Generalmente, los efectos en la madera se intensifican con las temperaturas o tiempos empleados (Hermoso *et al.* 2013; Bekhta & Niemz, 2003; Korkut & Budakçı, 2009; Gunduz *et al.* 2010).

Bekhta & Niemz (2003) obtienen disminuciones en resistencia a flexión estática del 44 al 50% y del 4 al 9% en el módulo de elasticidad (MOE) en madera de *Picea abies* tratada a 200°C en tiempos de hasta 24 horas. Boonstra *et al.* (2007) encuentran que en madera de *Pinus sylvestris* tratada en una etapa de hidrotermólisis (atmósfera de vapor) a 165°C durante 30 minutos y una segunda etapa de curado a 180°C, durante 6 horas, en atmósfera de nitrógeno, la resistencia a tensión es reducida un 39%, en flexión se reduce el 3%, para compresión paralela aumenta el 28%, en compresión tangencial aumenta el 8% y se reduce un 43% en compresión radial, la dureza Brinell paralela aumenta un 48% y en sentido perpendicular aumenta un 5%, mientras que para el MOE en flexión el aumento fue del 10%, en madera de *Pinus radiata*, *Picea abies* y *Pinus sylvestris* obtienen disminuciones en resistencia al impacto del 80, 79 y 56% respectivamente, para madera de *Pinus radiata* obtienen reducciones en flexión estática del 9 y 38% a 165 y 185°C respectivamente, además del 13% de aumento en MOE a 165°C. Korkut & Budakçı (2009) para madera de *Sorbus aucuparia* L. tratada a 120, 150 y 180°C en tiempos de 2, 6 y 10 horas, reportan disminuciones máximas del 13.42% en flexión, 19.91% en MOE a flexión, en compresión 24.33%, flexión por impacto 34.12%, tensión paralela y perpendicular el 28.40 y 21.67% respectivamente, esfuerzo cortante de 5.92%, resistencia a la hendidura 26.37% y para dureza Janka lateral el 12.83%. Gunduz *et al.* (2010), reportan para madera de *Abies bornmullerian* Mafft. Tratada a 170, 190 y 210°C en tiempos de 4, 8 y 12 horas disminuciones máximas del 22.8% para compresión paralela, en dureza Brinell tangencial, radial y longitudinal del 39.9, 45.1 y 41.1% respectivamente, Calonego *et al.* (2011) para madera de *Eucalyptus grandis* utilizan atmosfera con presencia de

oxígeno, temperaturas de 140, 160, 180 200 y 220°C, tiempos de 2.5 horas, obteniendo en compresión paralela incrementos máximos de 5.3% para su posterior disminución del 5.6% a 220°C, en MOR a flexión estática, disminución máxima del 52.3% y su correspondiente MOE disminuido del 8.4%. Sin embargo, entre los 140 a los 200°C dicho MOE presenta incrementos máximos del 5.6% y en dureza lateral una disminución máxima del 20.7%.

#### **2.4.1.5 Propiedades biológicas**

##### **➤ Durabilidad biológica**

La mejora de esta propiedad en madera tratada a altas temperaturas se le atribuye a la degradación en los componentes de la madera (azúcares de hemicelulosa), a la formación de nuevos compuestos más hidrofóbicos difíciles de digerir para los agentes fungosos o por su bajo contenido de humedad dificultando el medio para su desarrollo (Yinodotlgör & Kartal, 2010; Weiland & Guyonnet, 2003; Kamdem *et al.* 2002). La resistencia a la degradación biológica es mejorada según la especie tratada, tipo de agente y de acuerdo a las condiciones del proceso aplicado, como se reporta en la revisión hecha por Esteves & Pereira (2009) que muestran pérdidas de masa (por agentes fungosos) en probetas tratadas del 1-11% y para no tratadas de hasta el 67%.

#### **2.4.2 Termo tratamientos industrializados**

Los distintos procesos térmicos se enfocan en controlar la pirólisis de la madera empleando el desplazamiento del oxígeno, utilizando vapor de agua, nitrógeno, aceites (orgánicos), entre otros (Homan & Jorissen, 2004). Las temperaturas empleadas en los distintos métodos generalmente oscilan entre los 200°C, con tiempos de aplicación desde horas hasta días, con atmosferas inertes, estos métodos se emplean inicialmente a nivel industrial en países Europeos, y actualmente en Norteamérica, más recientemente surgen nuevos métodos como en Austria de la compañía Huber Holz (Esteves & Pereira, 2009), o el de Dinamarca llamado WTT Thermo Treatment que utiliza presiones atmosféricas de 3 a 19 bars (Metsä, 2011) a continuación son descritos brevemente algunos de estos.

➤ **ThermoWood process**

Proceso finlandés, compuesto de la fase de secado con temperaturas de 100 a 150°C y tiempos de hasta 48 horas, fase de tratamiento de modificación con temperaturas constantes de 150 a 240°C por periodos de 0.5 a 4 horas y fase de acondicionamiento que emplea temperaturas cercanas a 70°C por arriba de 24 horas, en esta técnica se usa presión atmosférica y un ambiente con vapor de agua, puede ser tratada la madera verde o seca (Järmsä, & Viitaniemi, 2001; Syrjänen & Kestopuu, 2001 )

➤ **PLATO-Wood**

Proceso de los Países Bajos, para madera seca o verde, tiene tres fases, la de hidrotermólisis donde la madera se calienta bajo la presión de vapor saturado (o por aire caliente) en un ambiente con presión superior a la atmosférica, temperaturas entre 160 a 190°C, tiempo de 4 a 5 horas, fase intermedia de 3 a 5 días de secado convencional al 10%, la fase de curado, con temperaturas de entre 170 y 190°C, tiempos de 14 a 16 horas, a presión atmosférica, finalmente la etapa de acondicionamiento con tiempo de 2 a 3 días (Militz & Tjeerdsma, 2001; Homan & Jorissen, 2004)

➤ **Retification (Retified Wood)**

Proceso francés diseñado para madera con contenido de humedad del 12%, se utiliza atmosfera de nitrógeno para desplazar el oxígeno, las temperaturas constantes son entre 210 y 240°C (Vernois, 2001).

➤ **Le Bois Perdure**

Proceso francés, en el cual se utiliza la madera sin secar, aprovechando la humedad de esta para generar una atmósfera de vapor durante la primera etapa de secado, en la segunda etapa la madera es calentada a través del vapor saturado a temperatura por arriba de 230°C (Vernois, 2001)

➤ **Oil Heat Treatment (OHT-Process)**

Proceso alemán, para madera con humedad saturada, se basa en el calentamiento de la madera a través de inmersión en aceite vegetal (linaza, soya, girasol), a temperaturas de entre 180 a 220°C, incluyendo la fase de calentamiento, tratamiento y enfriamiento se han observado tiempos de hasta 18 horas, la presencia de oxígeno se ve disminuida al ser desplazado por aceite durante el tratamiento (Rapp & Sailer, 2001).

➤ **WESTWOOD**

Proceso americano, diseñado para madera de latifoliadas y de coníferas, utiliza atmosferas saturadas con vapor de agua, temperaturas entre los 210 a 230°C, tiempos de temperatura máxima de 2 a 3 horas y totales de 18 a 24 horas, emplea un sistema que monitorea más de 20 parámetros cada 5 segundos al interior de la cámara, esto le permite control sobre la ola de calor en 3 dimensiones; El tipo, tamaño, geometría, contenido de humedad y composición química son variables tomadas en cuenta por el sistema, ajustando automáticamente el proceso (Westwood Timber Group, 2014).

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 General

Determinar el efecto del termo-tratamiento en las propiedades físico-mecánicas de madera de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik).

#### 3.2 Específicos

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de madera de *Vitex gaumeri* sin tratamiento y con tratamiento térmico a 160 y 200 °C con un tiempo de 2.5 horas.
  - a) Densidad básica
  - b) Densidad aparente
  - c) Contenido de humedad
  - d) Hinchamiento
  - e) Contracción
  - f) Dureza estática
  - g) Extracción de clavo
  - h) Compresión paralela a la fibra
  - i) Flexión estática

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Material de estudio

La madera de *Vitex gaumeri* se obtuvo de un árbol de aproximadamente 15 años de edad, con 13 metros de altura, diámetro a la altura del pecho (DAP) de 0.33 m, copa equilibrada, proveniente de la selva situada en el ejido Juan Sarabia Municipio de Otón Palo Blanco, Estado de Quintana Roo. Las probetas observadas en la figura 4.1 se extrajeron del fuste a una altura de 1.20 m hasta 4.80 m y fueron confeccionadas a las dimensiones descritas en la tabla 4.1. Las probetas se acondicionaron a 12% de C.H. en el interior del laboratorio de física y mecánica de la madera de la FITECMA.

Tabla 4.1 Dimensión de las probetas

Ensayo	Ancho (mm)	Grueso (mm)	Largo (mm)
Densidad	20	20	20
Contenido de humedad	20	20	20
Hinchamiento	20	20	20
Contracción	20	20	20
Dureza estática	50	50	50
Extracción de clavo	50	50	150
Compresión paralela	20	20	60
Flexión estática	20	20	350



Figura 4.1 Probetas de ensayo de la madera de *Vitex gaumeri*

## 4.2 Equipo

La parte experimental de esta investigación se desarrolló empleando el equipo de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, descritos a continuación.

-Horno digital

Utilizado para la deshidratación de las probetas durante la determinación del contenido de humedad y para el tratamiento térmico de las mismas; El horno emite el calor en forma de radiación, alcanzando temperaturas de hasta 250°C (figura 4.2).



Figura 4.2 Horno digital para deshidratación y tratamiento térmico

#### -Máquina universal

Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina universal Shimadzu (figura 4.3), con capacidad de carga de hasta 10 toneladas y con cilindro graficado, de donde se obtuvieron las curvas de esfuerzo-deformación.



Figura 4.3 Máquina universal para ensayos mecánicos

## 4.3 Metodología

### 4.3.1 Medición de probetas

Se midieron las probetas en longitud, ancho y grueso, para calcular su volumen al momento del ensayo (ver figura 4.4). La variabilidad dimensional que presentan las probetas al momento de su confección hizo necesaria su medición individual utilizando calibrador.

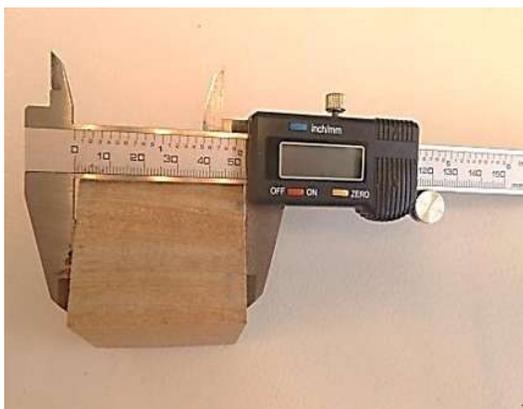


Figura 4.4 Medición de probetas

### 4.3.2 Determinación del peso de las probetas

Las probetas se pesaron antes de cada ensayo y una vez concluidos estos se procedió a secarlas en estufa  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante. Los valores se utilizaron en el cálculo del contenido de humedad y la densidad de las probetas (figura 4.5). Los pesos de las probetas fueron determinados en una balanza digital marca OHAUS.



Figura 4.5 Determinación del peso de las probetas

### 4.3.3 Determinación de la densidad aparente

Para la determinación de esta propiedad se utilizaron valores de peso y volumen a un mismo contenido de humedad (probeta climatizada) en cada una de las probetas, específicamente medidos antes de cada ensayo; para el cálculo de los valores se empleó la fórmula 1.

$$Da = \frac{Ph}{Vh} \quad (1)$$

Donde:

$Da$  = Densidad aparente a un C.H. determinado ( $g\ cm^{-3}$ )

$Ph$  = Peso a un C.H. determinado ( $g$ )

$Vh$  = Volumen a un C.H. determinado ( $cm^3$ )

### 4.3.4 Determinación de la densidad básica

La densidad básica se determinó con el volumen de las probetas medido después de haber permanecido 48 horas sumergidas en agua y utilizando el peso anhidro obtenido por desecación de las probetas en horno a  $103 \pm 2^\circ C$  hasta peso constante; los cálculos fueron realizados a través de la siguiente fórmula (2):

$$Db = \frac{Po}{Vv} \quad (2)$$

Donde:

$Db$  = Densidad básica ( $g\ cm^{-3}$ )

$Po$  = Peso anhidro ( $g$ )

$Vv$  = Volumen verde ( $cm^3$ )

#### 4.3.5 Determinación de contenido de humedad

Se determinó en todas las probetas después de realizados los distintos ensayos, el procedimiento consistió en el secado de éstas a  $103^{\circ}C \pm 2$  hasta peso constante, una vez determinado el peso anhidro se utilizó este valor junto al peso de las probetas registrado antes de los ensayos y se calculó el contenido de humedad empleando la formula (3).

$$C.H. = \left( \frac{Ph - Po}{Po} \right) 100 \quad (3)$$

Donde:

$C.H.$  = Humedad de la probeta (%)

$Ph$  = Peso húmedo ( $g$ )

$Po$  = Peso anhidro ( $g$ )

#### 4.3.6 Determinación de hinchamiento

Para este ensayo las probetas se mantuvieron inmersas en agua (ver figura 4.6) a 2, 24 y 48 horas, en cada periodo se pesaron y midieron. La determinación de hinchamiento lineal y volumétrico, así como el coeficiente y anisotropía de hinchamiento se calcularon a través de las ecuaciones 4, 5, 6 y 7 respectivamente.

Hinchamiento lineal

$$\alpha = \left( \frac{Lv - Lo}{Lo} \right) 100 \quad (4)$$

Donde:

$\alpha$  = Hinchamiento a 2, 24 y 48 horas en una dirección dada (%)

$Lv$  = Longitud a 2, 24 y 48 horas en una dirección dada (mm)

$Lo$  = Longitud anhidra en una dirección dada (mm)

Hinchamiento volumétrico

$$\alpha_v = \left( \frac{Vv - Vo}{Vo} \right) 100 \quad (5)$$

Donde:

$\alpha_v$  = Hinchamiento volumétrico a 2, 24 y 48 horas (%)

$Vv$  = Volumen a 2, 24 y 48 horas (mm<sup>3</sup>)

$Vo$  = Volumen anhidro (mm<sup>3</sup>)

Coefficiente de hinchamiento

$$v = \frac{\alpha h}{h} \quad (6)$$

Donde:

$v$  = Coeficiente de hinchamiento volumétrico

$\alpha h$  = Hinchamiento volumétrico hasta un C.H. determinado

$h$  = Contenido de humedad determinado

Anisotropía de hinchamiento

$$A_{\alpha} = \frac{\alpha_t}{\alpha_r} \quad (7)$$

Donde:

$A_{\alpha}$  = Anisotropía de hinchamiento

$\alpha_t$  = Hinchamiento tangencial a 2, 24 y 48 horas de inmersión

$\alpha_r$  = Hinchamiento radial a 2, 24 y 48 horas de inmersión



Figura 4.6 Probetas inmersas para hinchamiento

#### 4.3.7 Determinación de la contracción

De acuerdo al procedimiento de las normas ISO 4858 y 4469 en este ensayo se midieron y pesaron las probetas en su estado verde y anhidro, realizando 2 mediciones (ver figura 4.7) en cada dirección, promediándose este valor, para tal efecto dichas probetas se tomaron del ensayo de hinchamiento, después de estar 48 horas en inmersión. Para su deshidratación fueron expuestas en horno de secado a  $103 \pm 2$  °C hasta peso constante. Los cambios lineales y volumétricos sufridos, así como la anisotropía de contracción, se calcularon a través de las fórmulas 8, 9 y 10. Por la precisión de los cambios dimensionales en hinchamiento y contracción se utilizó un micrómetro CORDIX 1/10mm para medir puntualmente en las caras de las probetas.

Contracción lineal

$$\beta = \left( \frac{Lv - Lo}{Lv} \right) 100 \quad (8)$$

Donde:

$\beta$  = Contracción en una dirección dada (%)

$Lv$  = Longitud en estado verde (mm)

$Lo$  = Longitud anhidra (mm)

Contracción volumétrica

$$\beta v = \left( \frac{Vv - Vo}{Vv} \right) 100 \quad (9)$$

Donde:

$\beta v$  = Contracción volumétrica máxima (%)

$Vv$  = Volumen verde (mm<sup>3</sup>)

$Vo$  = Volumen anhidro (mm<sup>3</sup>)

Anisotropía de contracción

$$A\beta = \frac{\beta t}{\beta r} \quad (10)$$

Donde:

$A\beta$  = Anisotropía de contracción

$\beta t$  = Contracción tangencial (%)

$\beta r$  = Contracción radial (%)



Figura 4.7 Medición de las probetas de hinchamiento-contracción

#### 4.3.8 Determinación de Dureza Janka

En este ensayo se aplicó fuerza a penetración constante de una semiesfera de 11.28 mm de diámetro sobre la superficie de la madera hasta dejar una huella de sección circular de 1cm<sup>2</sup>, a velocidad constante de 6 mm/minuto (figura 4.8) como lo indica la norma ISO-3350. Esta operación se realizó sobre las dos caras transversales y dos laterales adyacentes (figura 4.9) con la finalidad de promediar un valor transversal y uno lateral, los cálculos se realizaron a través de la fórmula 11, ya que el valor de dureza fue interpretado como la carga máxima requerida para penetrar la esfera y romper la cohesión del material.

$$D = \frac{P}{S} \quad (11)$$

Donde:

$D$  = Dureza Janka (kg cm<sup>-2</sup>)

$P$  = Carga requerida (kg)

$S$  = Superficie de la huella (cm<sup>2</sup>)



Figura 4.8 Ensayo de Dureza Janka

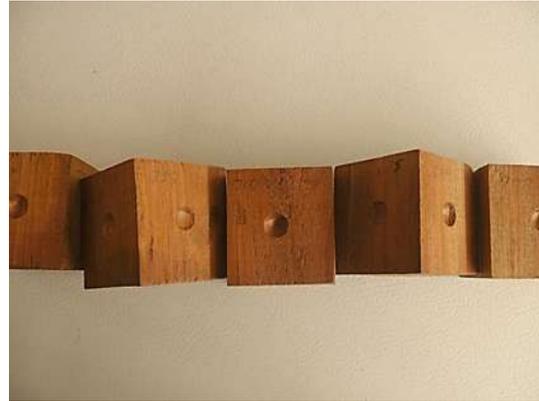


Figura 4.9 superficie lateral ensayada (200°C)

#### 4.3.9 Determinación de resistencia a extracción de clavo

Se utilizaron clavos de 5 cm de longitud y 2.5 mm de diámetro, punta diamante, penetrados a una profundidad de 32 mm sobre una cara radial, una tangencial y las transversales de las probetas (ver figura 4.10), la extracción fue a una velocidad constante de 2 mm/min, como lo indica la norma ASTM D-143/2009, los cálculos se realizaron con la fórmula 12.

$$R = P \quad (12)$$

Donde:

$R$  = Resistencia a la extracción de clavo

$P$  = Carga máxima de extracción (kg)

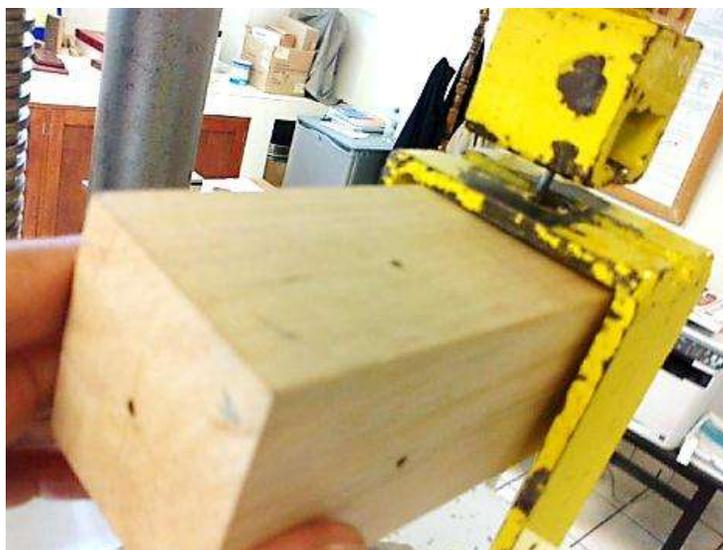


Figura 4.10 Ensayo de resistencia a extracción de clavo

#### 4.3.10 Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ISO-3787 aplicando el cabezal de carga a una velocidad de avance de 3 mm/min sobre la cara transversal de las probetas apoyadas sobre un metal (ver figura 4.11), para el cálculo de la resistencia a compresión se utilizó la siguiente fórmula (13):

$$RC = \frac{P}{A} \quad (13)$$

Donde:

$RC$  = Resistencia a la compresión ( $\text{kg cm}^{-2}$ )

$P$  = Carga de rotura (kg)

$A$  = Área de la sección transversal ( $\text{cm}^2$ )



Figura 4.11 Ensayo de resistencia a compresión paralela

#### 4.3.11 Determinación de resistencia a la flexión estática

Para este ensayo se utilizó la norma ISO-3133, las probetas se sometieron a esfuerzo de flexión estática de tres puntos, aplicando la carga en el centro de la probeta a una velocidad constante de 3 mm/min, sobre la cara radial, la distancia entre apoyos fue de 30 cm (ver figura 4.12). Los gráficos de las curvas esfuerzo-deformación obtenidas se utilizaron para determinar el módulo de elasticidad (MOE). Los cálculos se realizaron con las fórmulas 14 y 15:

$$MOR = \frac{M}{W} = \frac{3PLs}{2ah^2} \quad (14)$$

$$MOE = \frac{\Delta PLs^3}{4ah^3\Delta d} \quad (15)$$

Donde:

MOR= Módulo de rotura a la flexión estática ( $\text{kg cm}^{-2}$ )

$M$  = Momento de flexión

$W$  = Momento resistente

$P$  = Carga de rotura (kg)

$L_s$  = Distancia entre soportes (cm)

$a$  = Ancho de la probeta (cm)

$h$  = Altura de la probeta (cm)

MOE =Módulo de elasticidad a la flexión estática ( $\text{kg cm}^{-2}$ )

$\Delta P$  = Cualquier diferencia de fuerza en el campo elástico (kg)

$\Delta d$  = Deformación en el intervalo de  $\Delta P$  (cm)



Figura 4.12 Ensayo de resistencia a flexión estática

#### 4.3.12 Termotratamiento

a) Alta temperatura en condiciones de humedad: En esta primera etapa la madera a un contenido de humedad inicial del 12% fue expuesta a un aumento rápido de temperatura, este acelerado calentamiento se enfocó a alcanzar mayor velocidad de flujo térmico en la pared celular al tener humedad presente, esto para evitar en lo posible el gradiente de temperatura. Esta etapa, propició condiciones para un tratamiento mayormente seco una vez alcanzada la temperatura máxima.

b) Alta temperatura en condición seca: Durante esta etapa se alcanzó la temperatura máxima aplicada de 160 y 200°C dependiendo del tipo de tratamiento, iniciando en este punto el tiempo efectivo del tratamiento de 2.5 horas a temperatura constante, este proceso se desarrolló en una atmosfera no inerte (figura 4.13).

c) Una vez concluidas las 2.5 horas se apagó el horno manteniéndolo cerrado hasta el enfriamiento de las probetas (ver figura 4.14).



Figura 4.13 Probetas expuestas a alta temperatura



Figura 4.14 Probetas con termo-tratamiento

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Propiedades físicas de la madera

Los resultados bajo estudio son medidas de tendencia central (promedio), dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación y rango de la muestra), así mismo, ANOVA (análisis de varianza), homogeneidad (homogeneidad de varianzas), rangos múltiples (por pares de medias), regresión lineal simple (correlación) y los respectivos contenidos de humedad y densidad durante el ensayo.

#### 5.1.2 Densidad básica y aparente

Los valores promedios obtenidos para densidad básica y densidad aparente de las probetas sin termotratamiento son mostrados en la tabla 5.1; La densidad básica (0.50) coincide con la reportada por Chudnoff (1984) para esta especie (0.52 a 0.60), ligeramente por abajo debido al efecto de probetas que proceden de un árbol de cuando máximo 15 años que no alcanzó su plena madurez y que tuvo condiciones de crecimiento de alta competencia.

Tabla 5.1 Densidad básica y aparente de *Vitex gaumeri*

	Densidad básica	Densidad aparente
Promedio (g cm <sup>-3</sup> )	0.50	0.59
Desv. est. (g cm <sup>-3</sup> )	0.02	0.02
C. V. (%)	3.07	3.09
Máximo (g cm <sup>-3</sup> )	0.53	0.64
Mínimos (g cm <sup>-3</sup> )	0.48	0.56
Contenido de Humedad (%)		10.10

### 5.1.3 Hinchamiento radial

La tendencia general del hinchamiento radial observada en la tabla 5.2 es la disminución en los promedios de probetas termo tratadas en cada uno de los tiempos de inmersión, estas disminuciones son de hasta el 29.5%, evidentemente existe diferencia significativa entre valores de promedios como muestra el ANOVA de la tabla 5.3. Del análisis por el método de rangos múltiples observados en la figura 5.1 se destaca que las probetas termo tratadas tienen disminución de hinchamiento radial estadísticamente significativo a 2, 24 y 48 horas de inmersión respecto de las probetas testigo, así mismo, entre tratadas a 160°C y tratadas a 200°C con 2 y 48 horas de inmersión, obteniendo incluso 6.4% menos hinchamiento en probetas a 160 °C inmersas 24 horas que en las testigo a 2 horas de inmersión. Con 24.4, 12.2% menos hinchamiento en probetas a 160 y 200°C respectivamente, inmersas 48 horas que en probetas testigo inmersas 24 horas; Se obtuvo homogeneidad de varianzas con un P-valor de 0.5395. Estos resultados coinciden con Boonstra (2006), quien cita que la madera termo tratada sufre una disminución higroscópica en la pared celular atribuida a la reducción de los grupos más hidrófilos (hidroxilo de la hemicelulosa), mayor inaccesibilidad de los grupos OH por las moléculas de agua debido al aumento relativo de celulosa cristalina y por reacciones de poli condensación en la lignina, generando menor hinchamiento. En general las probetas tratadas a 160 °C tienen el mayor rendimiento en esta propiedad debido a la contribución del parénquima radial (menos afectado a 160 que a 200°C).

Tabla 5.2 Hinchamiento radial de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200 °C.

	Hinch. radial a 2 h.			Hinch. radial a 24 h.			Hinch. radial a 48 h.		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio (%)	3.10	1.78	2.24	4.10	2.90	3.30	4.40	3.10	3.60
Desv. est. (%)	0.50	0.50	0.60	0.20	0.60	0.50	0.20	0.60	0.50
C. V. (%)	17.20	29.20	24.70	4.80	19.10	16.70	5.20	18.90	14.60
Máximo (%)	4.10	2.60	2.80	4.60	4.20	3.80	4.80	4.20	4.30
Mínimo (%)	2.30	1.00	1.00	3.80	2.20	1.80	4.00	2.20	2.30
C.H. (%)	27.10	24.50	18.60	53.20	41.80	35.00	68.80	57.90	47.00
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )	0.67	0.66	0.64	0.77	0.72	0.70	0.84	0.80	0.75

D. a. = Densidad aparente

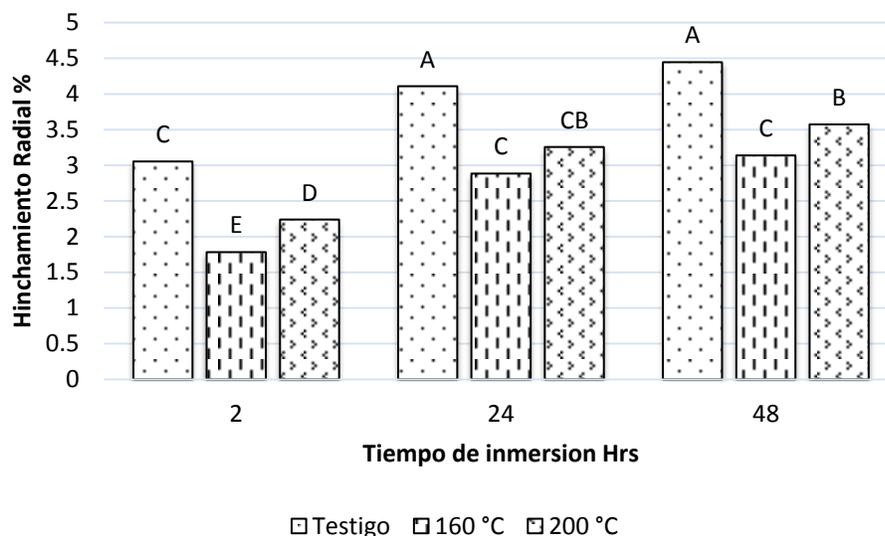


Figura 5.1 Hinchamiento radial de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200°C (ABCDE) Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa para  $\alpha=0.05$

Tabla 5.3 Análisis de varianza (ANOVA) del hinchamiento radial

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	8	66.92740741	8.36592593	33.84	<.0001
Intra-grupos	99	24.47333333	0.24720539		
Corrección Total	107	91.40074074			

### 5.1.4 Hinchamiento tangencial

Los resultados de la tabla 5.4 muestran tendencia a disminuir el hinchamiento con aumento de temperatura aplicada en probetas, esto en 2, 24 y 48 horas de inmersión en hasta un 23.8%, esta disminución es estadísticamente significativa de acuerdo al ANOVA de la tabla 5.5. Sin embargo, son las probetas tratadas a 200°C las que disminuyen significativamente su hinchamiento respecto de las testigos, así lo indican los grupos de Duncan observados en la figura 5.2. El hinchamiento menor de probetas tratadas a 200°C respecto de las testigo a 2, 24

y 48 horas de inmersión es del 23.8, 16.9 y 10.2% respectivamente; se obtuvo un P-valor de 0.7014 en la prueba de Levene que demuestra la igualdad de varianza. Estos resultados coinciden con los reportados por Esteves & Pereira (2009), quienes citan que son consecuencia de los cambios químicos en la pared celular durante el tratamiento y reducen del 10 al 50%.Tabla 5.4

Hinchamiento tangencial de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200 °C.

	Hinch. t. a 2 h.			Hinch. t. a 24 h.			Hinch. t. a 48 h.		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio (%)	4.20	3.60	3.20	7.10	6.80	5.90	7.80	7.70	7.00
Desv. Est. (%)	1.00	0.70	0.60	1.10	0.90	1.00	0.90	1.00	1.00
C. V. (%)	22.90	19.20	18.80	14.90	12.60	16.80	12.00	12.90	14.60
Máximo (%)	5.60	4.80	3.70	8.30	8.00	7.40	9.30	9.00	7.90
Mínimos (%)	2.90	2.20	1.80	5.50	5.30	3.90	6.50	6.10	4.60
C.H. (%)	27.10	24.50	18.60	53.20	41.80	35.00	68.80	57.90	47.00
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )	0.67	0.66	0.64	0.77	0.72	0.70	0.84	0.80	0.75

D. a. =Densidad aparente

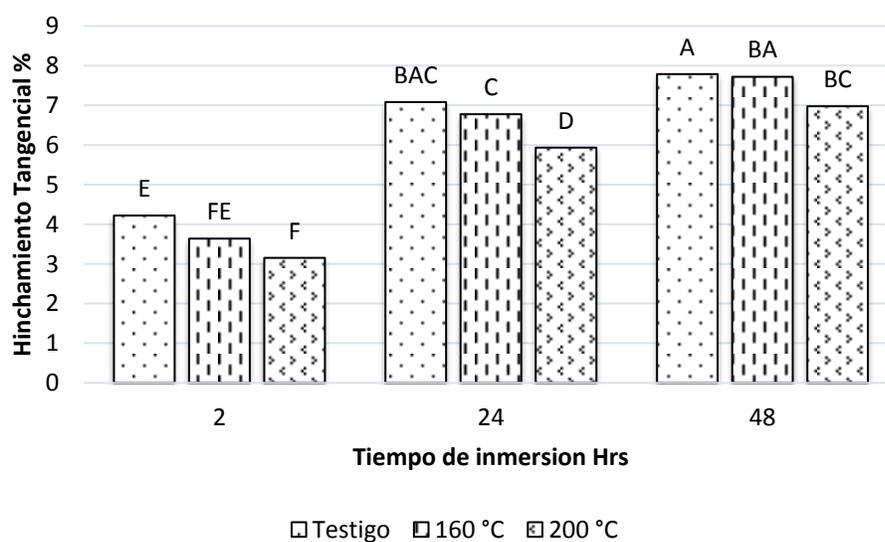


Figura 5.2 Hinchamiento tangencial de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C (ABCDEF) Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa para  $\alpha=0.05$

Tabla 5.5 Análisis de varianza (ANOVA) del hinchamiento tangencial

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	8	308.3529630	38.5441204	46.12	<.0001
Intra-grupos	99	82.7391667	0.8357492		
Corrección Total	107	391.0921296			

### 5.1.5 Hinchamiento volumétrico

Los resultados de la tabla 5.6 indican menor hinchamiento en las probetas con termotratamiento en cada etapa de inmersión, de hasta un 19.32% menor empleando 200°C y hasta un 25.6% menor para 160°C esto lo podemos observar de manera gráfica en la comparación de prueba de Duncan (figura 5.3); Los resultados en la prueba de Levene nos indican aceptación a la hipótesis nula con un P-valor de 0.9631 y evidentemente en la tabla del ANOVA número 5.7 observamos diferencia estadísticamente significativa, lo cual para el test de rangos múltiples queda agrupado por diferencia significativa con probetas testigo por un lado y probetas con tratamiento por otro (figura 5.3). Además, se destaca que las probetas con termotratamiento presentaron menor hinchamiento a 48 horas que las probetas testigo a 24 horas de inmersión. Los resultados de las medias coinciden con Zanuncio *et al.* (2013) o con lo reportado por Esteves & Pereira (2009) y se deben a la disminución higroscópica en la pared celular señalada por Boonstra (2006).

Tabla 5.6 Hinchamiento volumétrico de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200 °C.

	Hinch. vol. a 2 h.			Hinch. vol. a 24 h.			Hinch. vol. a 48 h.		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio (%)	7.80	5.80	5.70	11.90	10.20	9.60	13.10	11.50	11.10
Desv. Est. (%)	1.20	1.00	0.90	1.10	0.90	1.10	0.90	1.10	1.20
C. V. (%)	15.60	18.00	16.10	9.20	9.20	11.70	7.00	9.40	10.80
Máximo (%)	9.90	7.90	6.80	13.30	11.70	10.90	15.10	13.00	12.20
Mínimos (%)	6.10	3.90	3.70	10.10	8.90	7.20	11.12	9.60	8.50
C.H. (%)	27.10	24.50	18.60	53.20	41.80	35.00	68.80	57.90	47.00
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )	0.67	0.66	0.64	0.77	0.72	0.70	0.84	0.80	0.75

D. a. = Densidad aparente

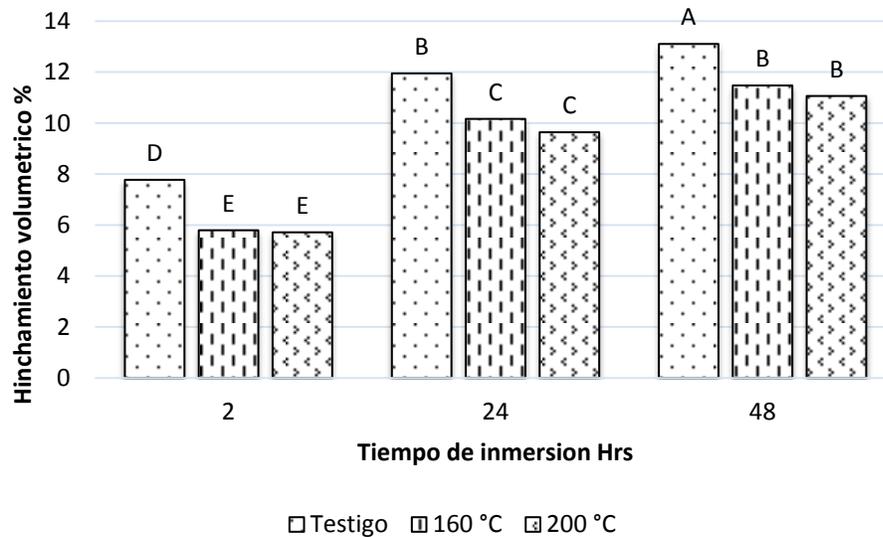


Figura 5.3 Hinchamiento volumétrico de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200°C (ABCDE) Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.7 Análisis de varianza (ANOVA) del hinchamiento volumétrico

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	8	678.5329630	84.8166204	74.69	<.0001
Intra-grupos	99	112.4191667	1.1355471		
Corrección Total	107	790.9521296			

### 5.1.6 Anisotropía de hinchamiento

De la tabla número 5.8 se desprende que esta propiedad tiende a incrementar su valor a mayor tiempo de inmersión. Sin embargo, son las probetas tratadas a 160°C las que presentan diferencia significativa respecto de la población testigo y de la madera tratada a 200°C en todas las etapas de inmersión con incrementos de hasta un 45.4%, esta comparación de promedios y grupos de Duncan son mostrados en la figura 5.4 donde se destaca que incluso a

2 horas de inmersión es mayor el valor de anisotropía de probetas a 160 °C que el de probetas testigo y probetas a 200°C a 48 horas de inmersión. El P-valor de 0.6465 para la prueba de Levene demostró la homogeneidad entre varianzas y evidentemente el ANOVA (tabla 5.9) demuestra tal diferencia estadísticamente significativa. Esto se debe a los cambios sufridos en hinchamiento radial y tangencial.

Tabla 5.8 Anisotropía de hinchamiento de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200°C.

	Anisotropía a 2 has			Anisotropía a 24 has			Anisotropía a 48 has		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio	1.40	2.17	1.54	1.73	2.43	1.92	1.76	2.56	2.01
Desv. Est.	0.29	0.65	0.70	0.27	0.55	0.73	0.30	0.60	0.05
C. V. (%)	20.93	29.83	45.53	15.91	22.68	37.91	15.10	25.40	16.00
Máximo	1.84	3.44	3.55	2.07	3.21	4.05	2.10	3.80	3.40
Mínimos	0.72	1.21	0.72	1.35	1.56	1.10	1.40	1.60	1.30

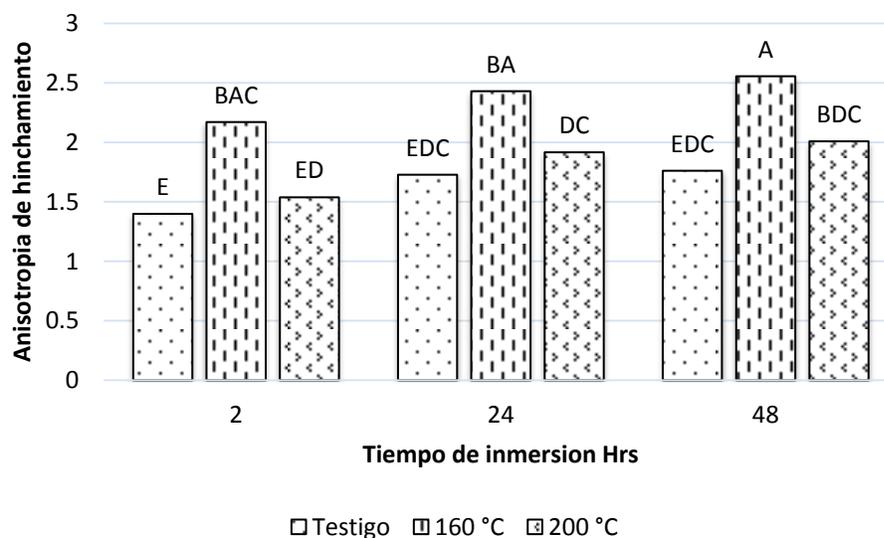


Figura 5.4 Anisotropía de hinchamiento en *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200°C (ABCDE) Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.9 Análisis de varianza (ANOVA) de anisotropía de hinchamiento

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	8	14.56346667	1.82043333	6.07	<.0001
Intra-grupos	99	29.71430000	0.30014444		
Corrección Total	107	44.27776667			

### 5.1.7 Coeficiente de hinchamiento

De acuerdo a la tabla 5.10 esta propiedad no presenta una tendencia clara ya que en madera tratada a 160°C sufre un decremento del 17.2% mientras que para la tratada a 200°C sufre un incremento, esta comparación se aprecia gráficamente en figura 5.5. El ANOVA (tabla 5.11) indica que sí existe diferencia significativa y para la prueba de Duncan esta se encuentra entre la madera tratada a 160 °C por un lado y la madera tratada a 200 °C junto con madera testigo por otro (figura 5.5). Con respecto a la homogeneidad de varianza se demostró con un P-valor de 0.4775 en la prueba de Levene.

Tabla 5.10 Coeficiente de hinchamiento v. de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200°C.

Coeficiente de hinchamiento	No tratada	160°C	200 °C
Promedio	0.29	0.24	0.31
Desv. est.	0.40	0.05	0.05
C. V. (%)	13.40	19.40	16.00
Máximo	0.34	0.32	0.36
Mínimos	0.22	0.17	0.23

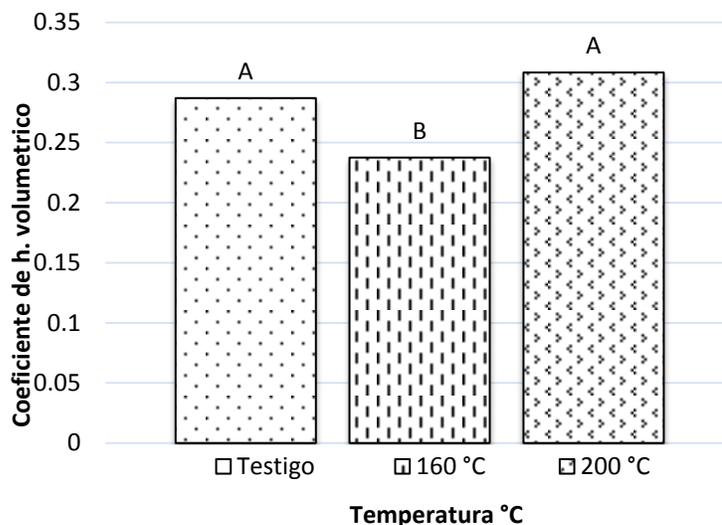


Figura 5.5 Coeficiente de hinchamiento volumétrico de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C

<sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.11 Análisis de varianza (ANOVA) de coeficiente de hinchamiento

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	0.03261667	0.01630833	8.12	0.0014
Intra-grupos	33	0.06625833	0.00200783		
Corrección Total	35	0.09887500			

### 5.1.8 Contracción

#### ➤ Contracción volumétrica

Los promedios para contracción volumétrica presentaron una disminución con el aumento de temperatura (tabla 5.12), del 11.2 y el 14.6% para probetas a 160 y 200°C respectivamente, esto se aprecia de manera gráfica en la figura 5.6. Se obtuvo homogeneidad entre varianzas con P-valor (0.5732), y los resultados del ANOVA se presentan en la tabla 5.13.

Tabla 5.12 Contracción de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada térmicamente a 160 y 200 °C.

	Con. volumétrica max.			Con. radial max.			Con. tangencial max.		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio (%)	11.60	10.30	9.90	4.30	3.00	3.40	7.20	7.20	6.50
Desv. est. (%)	0.70	0.90	1.00	0.20	0.60	0.50	0.80	0.90	0.90
C. V. (%)	6.20	8.50	9.90	5.00	18.30	14.10	11.10	12.00	13.80
Máximo (%)	13.10	11.50	10.90	4.60	4.00	4.10	8.50	8.30	7.30
Mínimos (%)	10.60	8.70	7.90	3.90	2.20	2.30	6.10	5.70	4.40
C.H. (%)	68.80	57.90	47.00	68.80	57.90	47.00	68.80	57.90	47.00
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )	0.84	0.80	0.75	0.84	0.80	0.75	0.84	0.80	0.75

D. a. = Densidad aparente

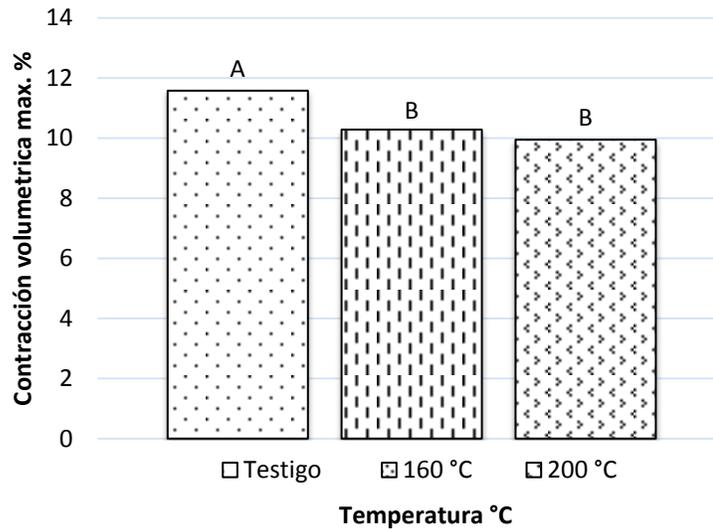


Figura 5.6 Contracción volumétrica máxima de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200°C

<sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa para  $\alpha=0.05$

Tabla 5.13 Análisis de varianza (ANOVA) de la contracción volumétrica

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	17.680	8.840	11.81	<.0001
Intra-grupos	33	24.698	0.748		
Corrección Total	35	42.378			

De acuerdo al ANOVA el tratamiento térmico sí tiene influencia significativa sobre esta propiedad y para la prueba de rangos múltiples la diferencia está entre las probetas testigo (grupo A) y las termo tratadas (grupo B) como se observa en la figura 5.6. Estos resultados coinciden con lo señalado por Esteves & Pereyra (2009) quienes reportan disminución entre el 10 y 50% y de acuerdo a Boonstra *et al.* (2006), se debe a que la madera termo tratada pierde capacidad higroscópica en su pared celular lo que repercute en menor cambio dimensional con la variación de humedad.

#### ➤ **Contracción radial**

De acuerdo a la tabla 5.12 se obtuvo menor contracción en las probetas tratadas a 160°C en sentido radial, la disminución es estadísticamente significativa de acuerdo al ANOVA mostrado en la tabla 5.14 ubicándose en tres grupos de Duncan (figura 5.7) con diferencia significativa entre cada uno de ellos, resultando para el tratamiento a 200°C una disminución del 20.9% y para el tratamiento a 160°C disminución del 30.2 % respecto de las probetas testigo; se demostró la homogeneidad entre varianzas con un P-valor de 0.1447 en la prueba de Levene. Esto se debe a la disminución higroscópica en la pared celular señalada por Boonstra (2006). La menor contracción radial en madera a 160°C respecto de la tratada a 200°C se explica con lo encontrado por Altgen *et al.* (2012) donde la madera termo tratada sufre severos colapsos y deformaciones en células de parénquima radial a mayor temperatura; así la mayor contribución de células de parénquima radial en probetas tratadas a 160 °C evitando menor contracción en este sentido.

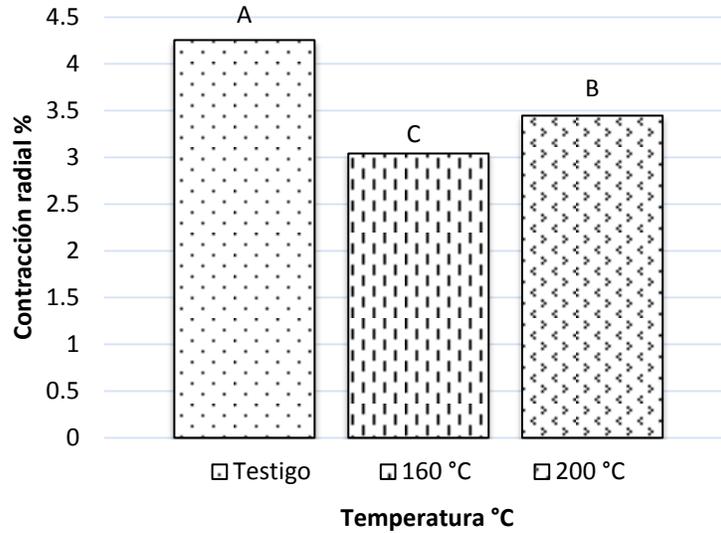


Figura 5.7 Contracción radial de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C  
 (ABC) Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa para  $\alpha=0.05$

Tabla 5.14 Análisis de varianza (ANOVA) de la contracción radial

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	9.47388889	4.73694444	24.49	<.0001
Intra-grupos	33	6.38250000	0.19340909		
Corrección Total	35	15.85638889			

➤ **Contracción tangencial**

La tabla de resultados 5.12 muestra una pequeña disminución en la contracción de probetas con tratamiento a 200 °C respecto de las testigo, sin embargo el ANOVA (tabla 5.15) nos indica que esta disminución no es significativa, por tal motivo existe un solo grupo de Duncan mostrado en la figura 5.8 de comparación de medias; se demostró la homogeneidad entre varianzas con un P-valor de 0.9072.

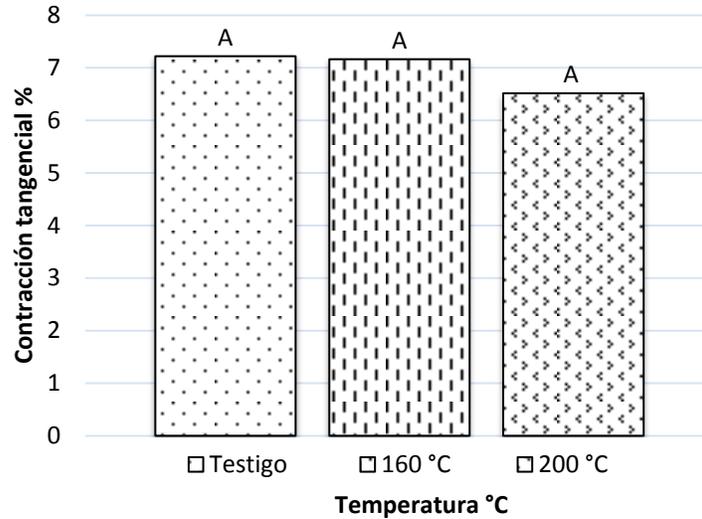


Figura 5.8 Contracción tangencial de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C

<sup>(A)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa para  $\alpha=0.05$

Tabla 5.15 Análisis de varianza (ANOVA) de la contracción tangencial

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	3.53166667	1.765833333	2.39	0.1069
Intra-grupos	33	24.33583333	0.73744949		
Corrección Total	35	27.86750000			

### ➤ Anisotropía de contracción

La tabla 5.16 Indica que el índice de anisotropía sufre un incremento en madera tratada a 160°C del 41.2% como resultado directo de los cambios en el cociente entre contracción tangencial y radial, esta propiedad se ve afectada negativamente, siendo estadísticamente significativa de acuerdo al ANOVA (tabla 5.17) y a la prueba de Duncan (figura 5.9) que distingue 2 grupos; El P-valor en la prueba de Levene fue de 0.1705 lo que indica homogeneidad de varianzas. La figura 5.9 muestra la comparación entre medias muestrales.

Tabla 5.16 Anisotropía de contracción de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada térmicamente a 160 y 200 °C.

Anisotropía de contracción.	No tratada	160°C	200°C
Promedio	1.7	2.4	1.9
Desviación estándar	0.2	0.6	0.5
C. V. (%)	14.1	24.4	25.4
Máximo	2.0	3.6	3.2
Mínimo	1.4	1.6	1.3

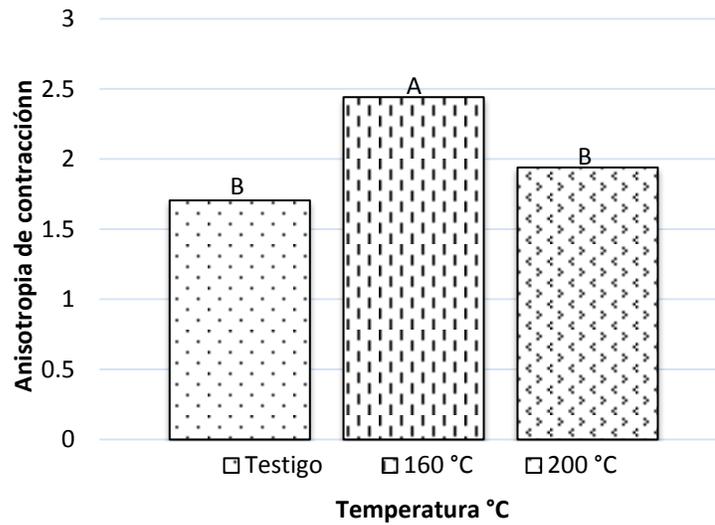


Figura 5.9 Anisotropía de contracción de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C

<sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa para  $\alpha=0.05$

Tabla 5.17 Análisis de varianza (ANOVA) de la anisotropía de contracción

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	3.30500000	1.65250000	7.35	0.0023
Intra-grupos	33	7.41500000	0.22469697		
Corrección Total	35	10.72000000			

## 5.1.9 Dureza

### ➤ Dureza Janka lateral

Del análisis de la tabla 5.18 se desprende que los valores promedio de los tres tratamientos se mantienen sin tendencia a disminuir o aumentar, como se puede apreciar en la figura 5.10. La madera tratada a 160°C presenta menor dispersión con menor rango respecto a los otros dos grupos denotando mayor certidumbre en los resultados. La poca influencia del tratamiento sobre la dureza lateral la podemos constatar en el análisis de varianza (tabla 5.19), donde se contrastan las medias de grupos y entre grupos con la resistencia como variable dependiente. Previo al ANOVA se demostró con la prueba de Levene un P-valor (0.0573) superior al nivel de significación 0.05, y así igualdad entre varianzas.

Tabla 5.18 Dureza Janka de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200 °C.

	Dureza lateral			Dureza axial		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio(kg cm <sup>2</sup> )	801.0	792.0	798.0	929.0	1118.0	1100.0
D. est. (kg cm <sup>2</sup> )	141.0	69.0	111.0	57.0	117.0	125.0
C. V. (%)	17.5	8.7	14.0	6.1	10.5	11.0
Máximo (kg cm <sup>2</sup> )	975.0	875.0	938.0	1028.0	1238.0	1238.0
Mínimo (kg cm <sup>2</sup> )	538.0	663.0	600.0	840.0	888.0	900.0
C.H. (%)	12.0	5.1	3.8	12.0	5.1	3.8
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )		0.68	0.68		0.68	0.68

D.a.= Densidad aparente

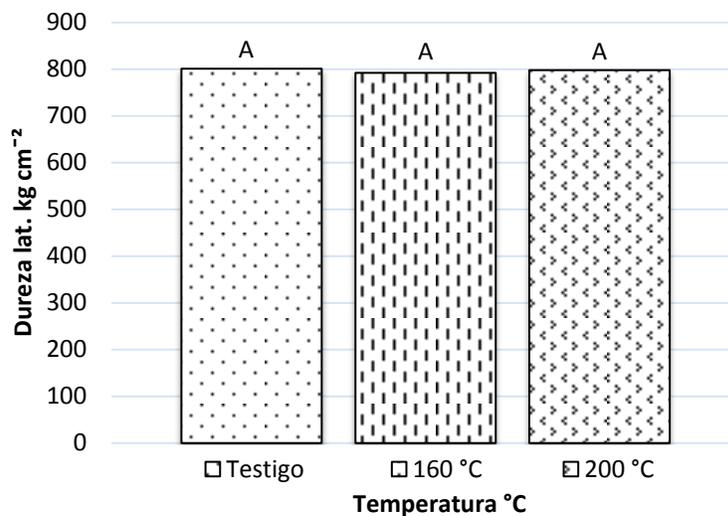


Figura 5.10 Dureza Janka lateral de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C

<sup>(A)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

En la tabla del ANOVA 5.19 se elige un nivel de significación de 0.05, así P-valor indica la conclusión estadística de no rechazo a la hipótesis nula con un 95% de confianza, mostrando que las medias muestrales de los tratamientos no son diferentes entre sí.

Tabla 5.19 Análisis de varianza (ANOVA) de la dureza lateral

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	487.6269	243.8134	0.02	0.9818
Intra-grupos	31	410609.314	13245.4618		
Corrección Total	33	411096.941			

### ➤ Dureza Janka axial

En la tabla 5.18 se observan aumentos en valores promedios de 20.35 % para madera a 160°C y del 18.4 % en madera a 200°C respecto de la probetas testigo, este aumento está acompañado de una mayor variabilidad en dichas poblaciones, el aumento puede ser explicado por la diferencia en contenidos de humedad observados en dicha tabla, no obstante, dados estos resultados positivos, en la figura 5.11 se muestran probetas a 200°C, las cuales presentaron la falla antes de que la media esfera penetrara, es decir, la presión concentrada sobre una superficie menor a un cm<sup>2</sup> logro dividir las fibras a lo largo de la pieza antes que comprimirlas, dejando inservibles a la mayoría antes de finalizado el ensayo, este fenómeno podría estar relacionado con la pérdida de resistencia a extracción de clavo en sentido tangencial observada en el ensayo del índice (5.2.1), debido a la propagación de grietas (en sentido longitudinal) por efecto de cuña al penetrar el clavo, situación que pone de manifiesto la resistencia a ser rajada en sentido longitudinal (hendidura). Este comportamiento es claro reflejo de una madera más vítrea (frágil mecánicamente). Finalmente el ensayo a dureza axial no fue un buen parámetro de evaluación en madera termo tratada de *Vitex gaumeri*.

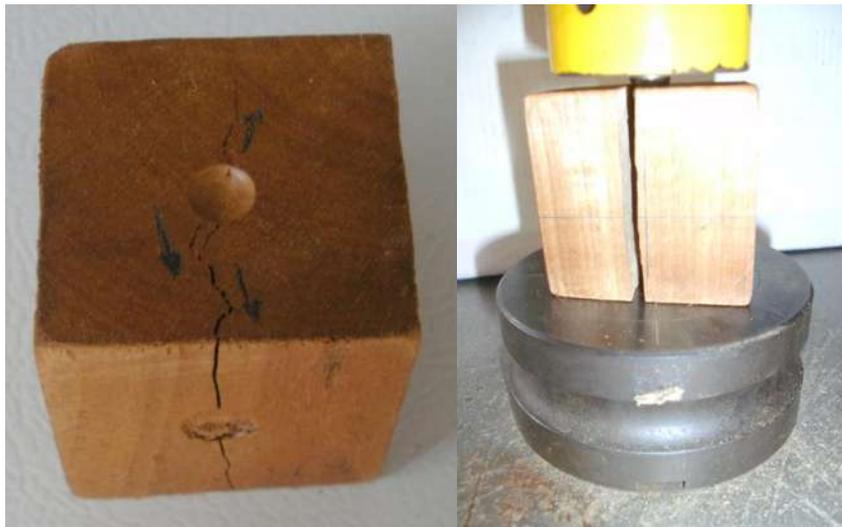


Figura 5.11 Ensayo dureza Janka axial (200°C)

Del test de Levene se obtuvo un P-valor de 0.0828 indicando homogeneidad de varianzas, y del ANOVA mostrado en la tabla 5.20 se rechaza la hipótesis nula en favor de la alternativa mostrando diferencia significativa entre promedios de al menos dos poblaciones, en el análisis por el método del rango múltiple de Duncan se determinó que las poblaciones de probetas con tratamiento térmico presentan tal diferencia respecto de la testigo, los resultados se observan en la figura 5.12. Estos incrementos coinciden con Boonstra *et al.* (2007) quienes reportan en *Pinus sylvestris* un 48% de aumento en dureza Brinell.

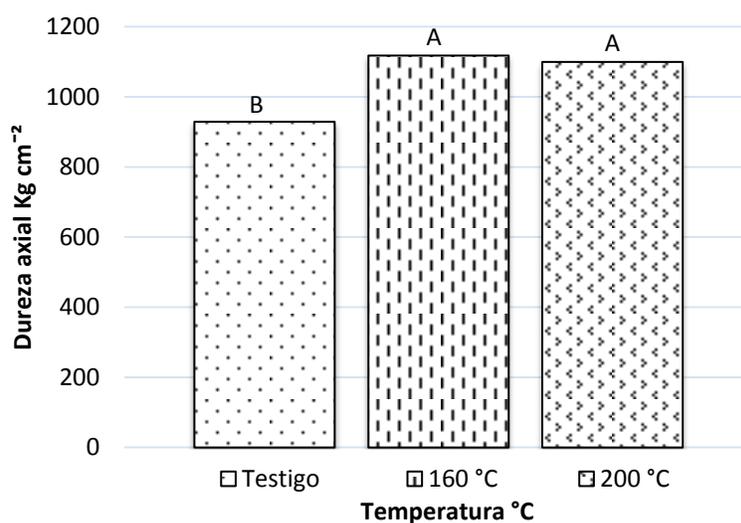


Figura 5.12 Dureza Janka axial de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C

<sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.20 Análisis de varianza (ANOVA) de la dureza lateral

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	259769.1857	129884.5929	13.76	<.0001
Intra-grupos	29	273774.8143	9440.5108		
Corrección Total	31	533544.0000			

## 5.2 Propiedades mecánicas de la madera

Los resultados de las variables bajo estudio son medidas de tendencia central (promedios), dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación y rango de la muestra), así mismo ANOVA (análisis de varianza), homogeneidad (homogeneidad de varianzas), rangos múltiples (por pares de medias), regresión lineal simple (correlación) y los respectivos contenidos de humedad y densidad durante el ensayo.

### 5.2.1 Extracción de clavo

#### ➤ Extracción dirección radial

De los valores mostrados en la tabla 5.21 para esta propiedad, observamos que la influencia del tratamiento fue prácticamente nula. En la comparación de medias muestrales (figura 5.13) se aprecia la similitud entre valores medios de las tres poblaciones y para la prueba de Levene el P-valor (0.6504) determina la igualdad entre varianzas así como el ANOVA de la tabla 5.22 muestra que no existe diferencia significativa entre medias muestrales con un 95% de nivel de confianza.

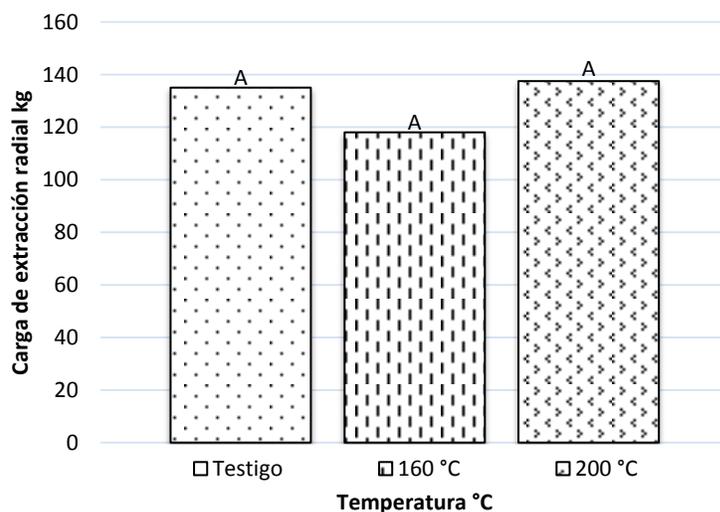


Figura 5.13 Extracción de clavo radial en madera de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200°C

(A) Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.21 Extracción de clavo en *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200 °C.

	Ext. radial			Ext. tangencial		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio(kg)	126.20	118.00	1375.00	134.20	120.50	90.50
Desv. est.(kg)	33.00	23.00	34.00	34.00	52.00	27.00
C. V. (%)	26.00	19.00	25.00	26.00	43.00	30.00
Máximo (kg)	179.00	140.00	170.00	193.50	186.00	118.00
Mínimos (kg)	81.50	90.00	90.00	58.50	60.00	54.00
C.H. (%)	14.70	6.00	5.60	14.70	6.00	5.60
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )	0.72	0.63	0.64	0.72	0.63	0.64

D. a. = Densidad aparente

Tabla 5.22 Análisis de varianza (ANOVA) de extracción radial

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	994.11111	479.05556	0.60	0.5604
Intra-grupos	15	12385.00000	825.66667		
Corrección Total	17	13379.11111			

### ➤ Extracción de clavo dirección tangencial

Los resultados de la tabla 5.21 muestran tendencia a pérdida de resistencia con el aumento de temperatura de la población tratada a 160 °C un 10.2 % y para probetas tratada a 200°C un 32.5 % esto respecto de la media testigo. La comparación de los promedios se presenta de manera gráfica en la figura 5.14, se comprobó la homogeneidad entre varianzas al obtener un P-valor de 0.1170 de la prueba de Levene y el ANOVA se muestra en la tabla 5.23.

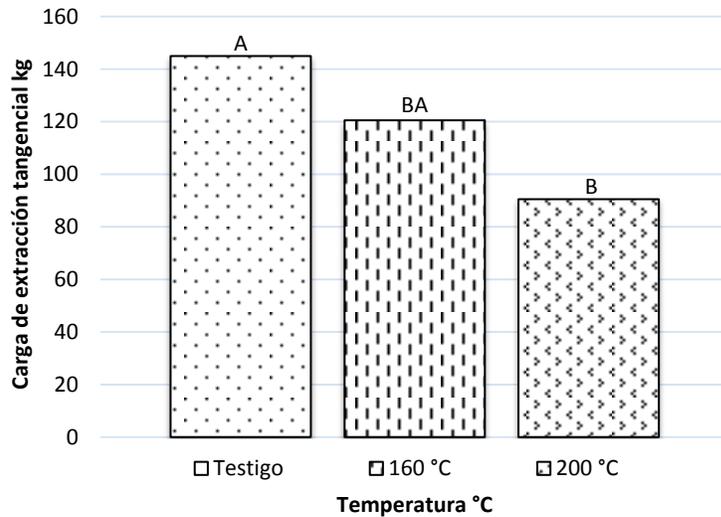


Figura 5.14 Extracción de clavo tangencial de *Vitex gaumeri* si tratar y tratada a 160 °C Y 200 °C

<sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

La tabla de ANOVA nos indica una diferencia estadísticamente significativa entre medias muestrales para un nivel de significación de 0.05, lo que supone influencia del tratamiento térmico en el comportamiento de esta propiedad, disminuyendo la resistencia con el aumento de temperatura para niveles de confianza del 95%. Para la prueba de rangos múltiples de Duncan la diferencia significativa se encuentra entre la madera no tratada y la tratada a 200 °C formando dos grupos diferentes y uno intermedio, vistos en la gráfica de barras (figura 5.14). De acuerdo a la estrecha relación entre esta propiedad y la resistencia a la hendidura (propagación de grietas) esta disminución se debe al incremento de fragilidad en madera tratada a 200°C al separar más fácilmente sus fibras en sentido longitudinal ante cargas externas concentradas, tal como lo reporta Korkut & Budakçı (2009).

Tabla 5.23 Análisis de varianza (ANOVA) de extracción de clavo radial

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	8716.90000	4358.455000	4.25	0.0344
Intra-grupos	15	15376.22500	1025.08167		
Corrección Total	17	24093.12500			

### 5.2.2 Compresión paralela

Como se puede observar en la tabla 5.24, la resistencia a la compresión en probetas tratadas tiene una tendencia a incrementarse a mayor temperatura, en un 16.1% para termo tratadas a 160°C y un 24% para termo tratada a 200 ° C. De la prueba de Levene se obtuvo un P-valor de 0.0055 que demuestra la hipótesis alternativa, es decir, desigual varianza de grupos, así que en lugar de ANOVA se empleó prueba de Kruskal-Wallis para el contraste ya que no requiere supuesto de normalidad (tabla 5.25) donde para un  $\alpha = 0.05$  se obtuvo diferencia estadística significativa entre valores de las medianas. De acuerdo a la prueba (post-hoc) de Kruskal-Wallis (tablas 5.26 y 5.27) y utilizando la corrección de Bonferroni ( $\alpha = 0.05 / 3 = 0.01667$ ) esta diferencia se encuentra entre probetas termo tratadas y probetas sin tratamiento, siendo más amplia para las tratadas a 200°C, la representación gráfica muestra claramente la mayor resistencia de probetas termo tratadas y el aumento significativo en la comparación de medianas en la figura 5.15 de caja y bigotes. Estos resultados de incremento en la resistencia coinciden con Boonstra *et al.* (2007) y Calonego *et al.* (2011) y podrían estar asociados a lo señalado por Boonstra *et al.* (2006) donde los componentes estructurales de la madera termo tratada que sufren mayor degradación térmica son la hemicelulosa (amorfo) y regiones amorfas de celulosa (semicristalinos) dando como resultado un material con un aumento relativo en su estructura cristalina con diferentes propiedades termoplásticas (frágil y duro), lo que finalmente modifica la interacción entre los componentes estructurales después del termotratamiento.

Tabla 5.24 Resistencia a compresión paralela de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200°C

Compresión paralela	No tratada	160°C	200°C
Promedio (kg cm <sup>-2</sup> )	563.00	654.00	701.00
Desv. est.(kg cm <sup>-2</sup> )	32.40	68.00	97.00
C. V. (%)	5.80	10.00	14.00
Máximo (kg cm <sup>-2</sup> )	624.00	771.00	832.00
Mínimos (kg cm <sup>-2</sup> )	514.00	570.00	549.00
C.H. (%)	10.90	6.80	5.35
Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0.67	0.62	0.63

Tabla 5.25 Análisis Kruskal-Wallis ANOVA por Rangos; resistencia a la compresión

Kruskal-Wallis test: H(2,N=34) = 15.94286 p= .0003			
Resistencia a la compresión	Código	N de grupos	Suma de Rangos
testigo	1	14	133.0000
160°C	2	10	214.0000
200°C	3	10	248.0000

H= valor del estadístico con 2 grados de libertad, N= tamaño total de la muestra

Tabla 5.26 Comparación por parejas no paramétricas (Post-hoc)

Kruskal-Wallis test: H(2,N=34) = 15.94286 p= .0003			
Resistencia última	Testigo R:9.5	160°C R:21.4	200°C R:24.8
testigo		0.011699*	0.000620*
160°C	0.011699*		1.000000
200°C	0.000620*	1.000000	

H= valor del estadístico con 2 grados de libertad, N= tamaño total de la muestra,

R= suma de rangos / N de grupos, \*= si hay diferencia estadística significativa.

Tabla 5.27 Diferencias por pares de filas y significación

comparación	dif. R/n	valor estadístico	dif. Significativa
Testigo-160 °C	1.462	0.011699	si
Testigo-200 °C	1.801	0.000620	si
160 °C-200 °C	0.34	1	no

R= suma de rangos, N= tamaño de grupos

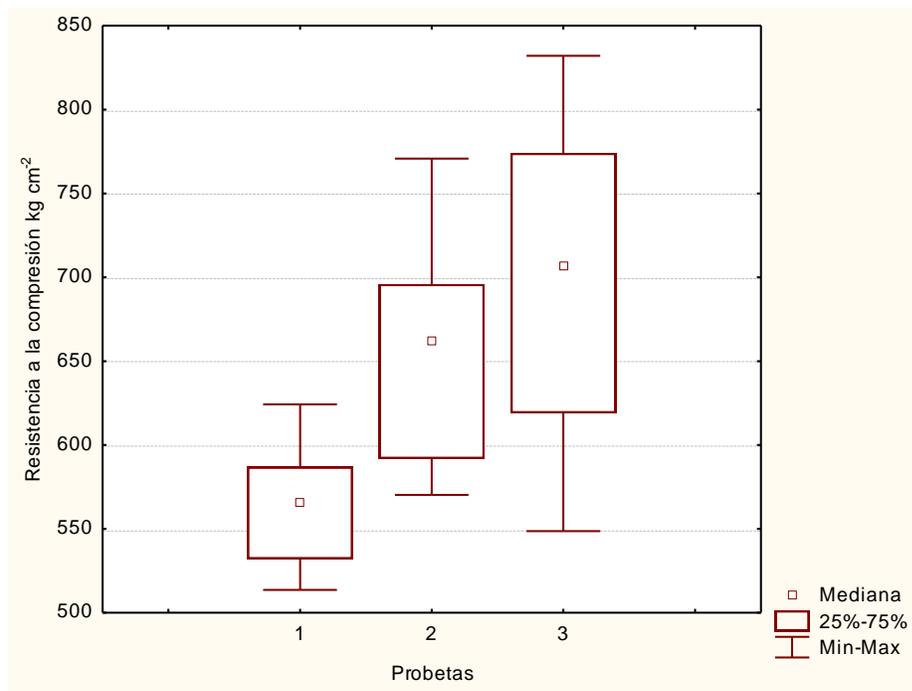


Figura 5.15 Resistencia a la compresión paralela  $\text{kg cm}^{-2}$

### 5.2.3 Flexión estática

#### ➤ Flexión estática (MOR)

Del análisis de la tabla 5.29 para esta propiedad se obtiene que las probetas tratadas a 160 °C son afectadas un 3.2% positivamente y las tratadas a 200 °C son afectadas un 14.1% negativamente, estas diferencias se observan en la comparación de medias muestrales en la figura 5.16, el resultado del ANOVA (tabla 5.28) indica que esta diferencia es estadísticamente significativa al 5 % de probabilidad y la prueba de Duncan encuentra esta

diferencia significativa en las probetas tratadas a 200 °C, es decir, el tratamiento a 160 °C aun cuando aumenta el valor de la propiedad, no afecta de manera significativa, dichos grupos de Duncan se muestran en la figura 5.16, de la prueba de Levene se obtuvo el P-valor de 0.4363 demostrando así homogeneidad de varianza. El decremento en los valores de las medias coinciden con Boonstra *et al.* (2006), Korkut & Budakci (2009), Gunduz *et al.* (2010), Calonego *et al.* (2011) y esto se debe a la condición de fragilidad en madera termo tratada al modificar la interacción entre sus componentes estructurales después del tratamiento.

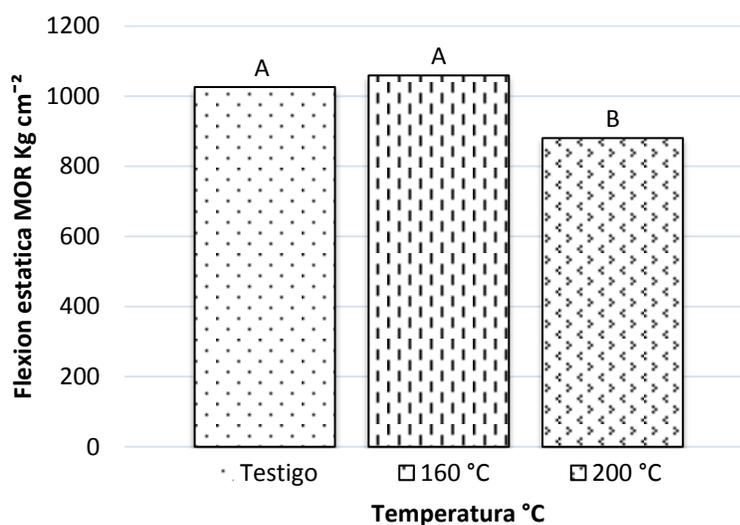


Figura 5.16 MOR en flexión estática de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 y 200 °C  
<sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.28 Análisis de varianza (ANOVA) de MOR a flexión estática

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	170194.82	85097.41	6.84	0.0038
Intra-grupos	28	348306.91	12439.53		
Corrección Total	30	518501.74			

Tabla 5.29 Flexión estática de *Vitex gaumeri* no tratada y tratada a 160 y 200 °C

	MOR Flexión estática			MOE Flexión estática		
	No tratada	160°C	200°C	No tratada	160°C	200°C
Promedio(kg cm <sup>2</sup> )	1026.00	1059.00	881.00	114743.00	116432.00	136234.00
D. est.(kg cm <sup>2</sup> )	107.00	134.00	87.00	29827.00	23557.00	22908.00
C. V. (%)	10.00	13.00	10.00	26.00	20.00	17.00
Máximo (kg cm <sup>2</sup> )	1178.00	1330.00	1063.00	168736.00	164426.00	161385.00
Mínimos (kg cm <sup>2</sup> )	823.00	910.00	757.00	69796.00	82938.00	98211.00
C.H. (%)	11.80	4.60	3.70	11.80	4.60	3.70
D. a. (g cm <sup>-3</sup> )	0.63	0.62	0.65	0.63	0.62	0.65

D. a.= Densidad aparente

### ➤ Flexión estática (MOE)

Los valores promedios obtenidos y mostrados en la tabla 5.29 indican tendencia al aumento en esta propiedad, de un 1.5% en probetas tratadas a 160°C y de un 18.7% en probetas tratadas a 200°C, sin embargo dichos valores no tienen diferencia estadística significativa de acuerdo al ANOVA de la tabla 5.30 y de acuerdo a este resultado forman un solo grupo de Duncan como se muestra en la comparación de medias (figura 5.17), se demostró la hipótesis nula con P-valor de 0.5349 en la prueba de Levene. Los incrementos en las medias coinciden con Boonstra *et al.* (2006) y Calonego *et al.* (2011); este aumento en el módulo elástico podría estar relacionado directamente con el aumento relativo en estructura cristalina en madera termo tratada.

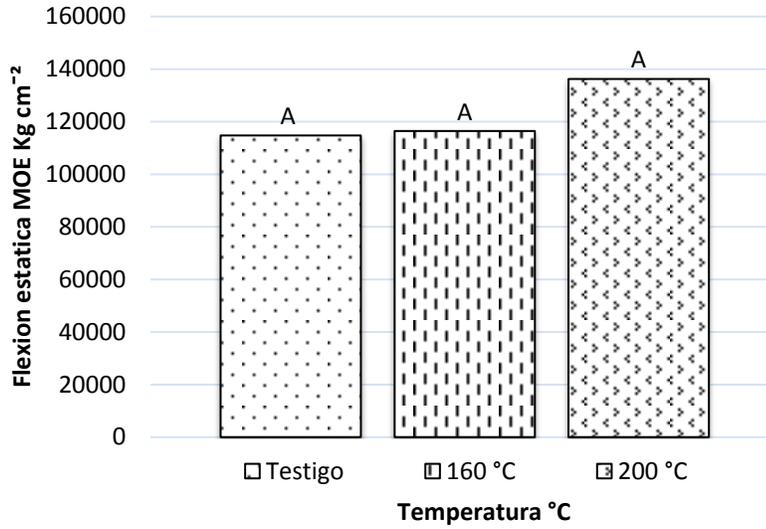


Figura 5.17 Comparación de medias de MOE en flexión estática de *Vitex gaumeri* sin tratar y tratada a 160 °C y 200 °C. <sup>(AB)</sup> Letras iguales indican que no existe diferencia estadísticamente significativa cuando  $\alpha=0.05$

Tabla 5.30 Análisis de varianza (ANOVA) del MOE en flexión estática

Fuente de variación	GL	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Valor F	Pr > F
Inter-grupos	2	2758523624	1379261812	2.03	0.1496
Intra-grupos	38	18978628674	677808167		
Corrección Total	30	21737152297			

### **5.3 Correlación de variables**

Con este análisis se estableció la correlación a través de la recta de regresión lineal simple y su correspondiente coeficiente de correlación, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

#### **5.3.1 Correlación flexión estática (MOR) y densidad aparente**

De la relación entre estas dos variables se obtuvo en probetas testigo una buena correlación, sin llegar a ser fuerte, con un coeficiente  $r = 0.74$ , esto abre la posibilidad de utilizar la ecuación de regresión (MOR flexión estática =  $-31.48 + 1673.4 * \text{Densidad de ensayo}$ ) y estimar un aproximado de los valores de flexión estática MOR a partir del peso específico aparente. De los resultados con las probetas termo tratadas a  $160^{\circ}\text{C}$  no se obtuvo correlación estadística alguna dando un coeficiente  $r = 0.05$  y para tratadas a  $200^{\circ}\text{C}$  una débil correlación con un  $r = 0.52$ , así para madera termo tratada disminuye la correlación, impidiendo el empleo de la ecuación de regresión, estos resultados se muestran gráficamente en las figuras 5.18, 5.19, y 5.20 para cada una de las poblaciones.

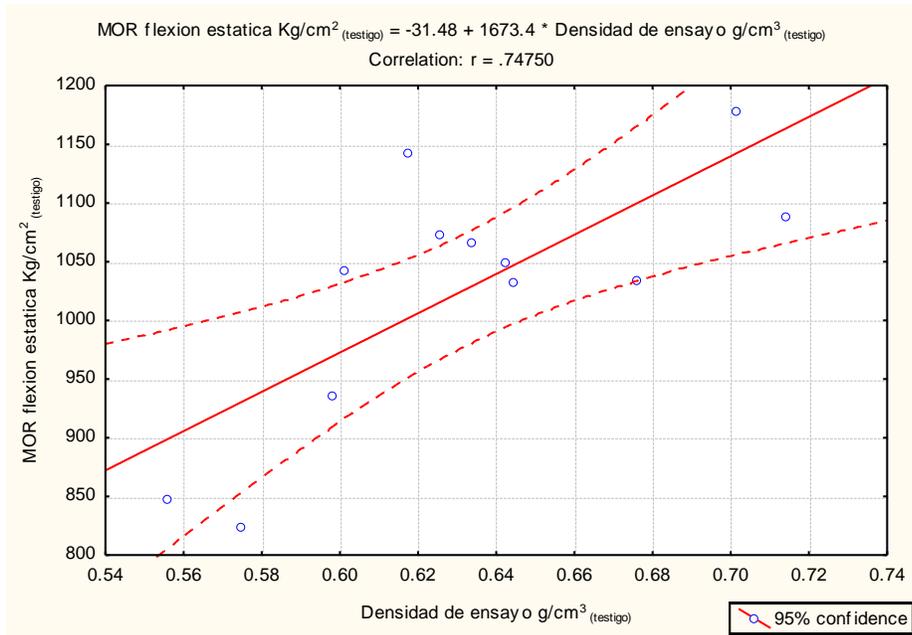


Figura 5.18 Regresión entre MOR flexión y densidad de ensayo (testigo)

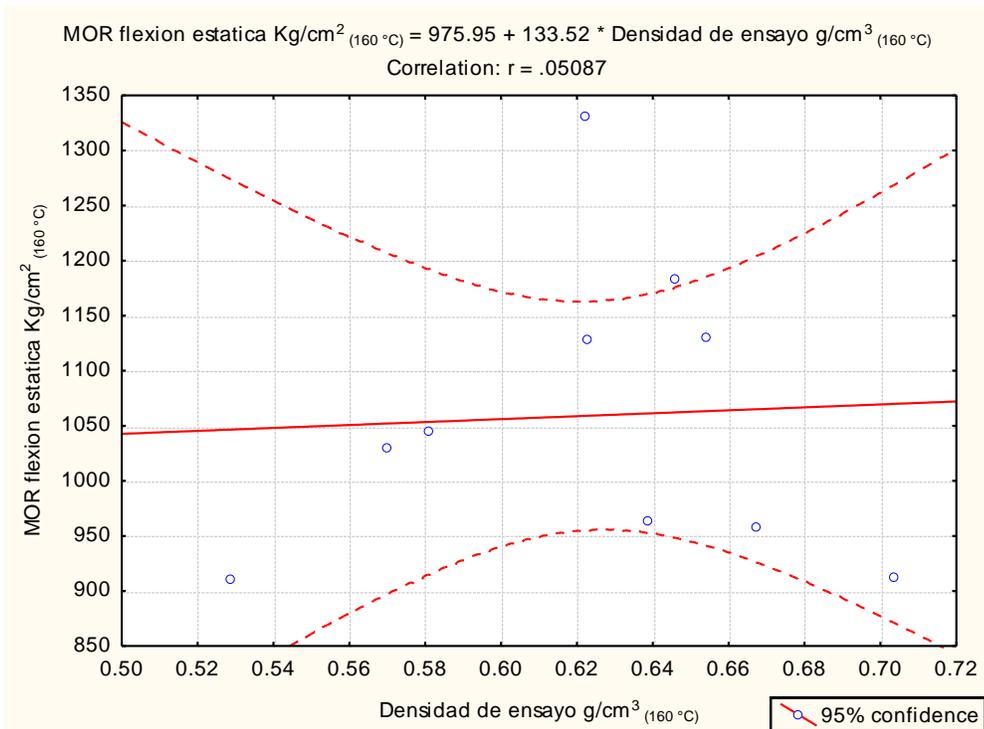


Figura 5.19 Regresión entre MOR flexión y densidad de ensayo (160 °C)

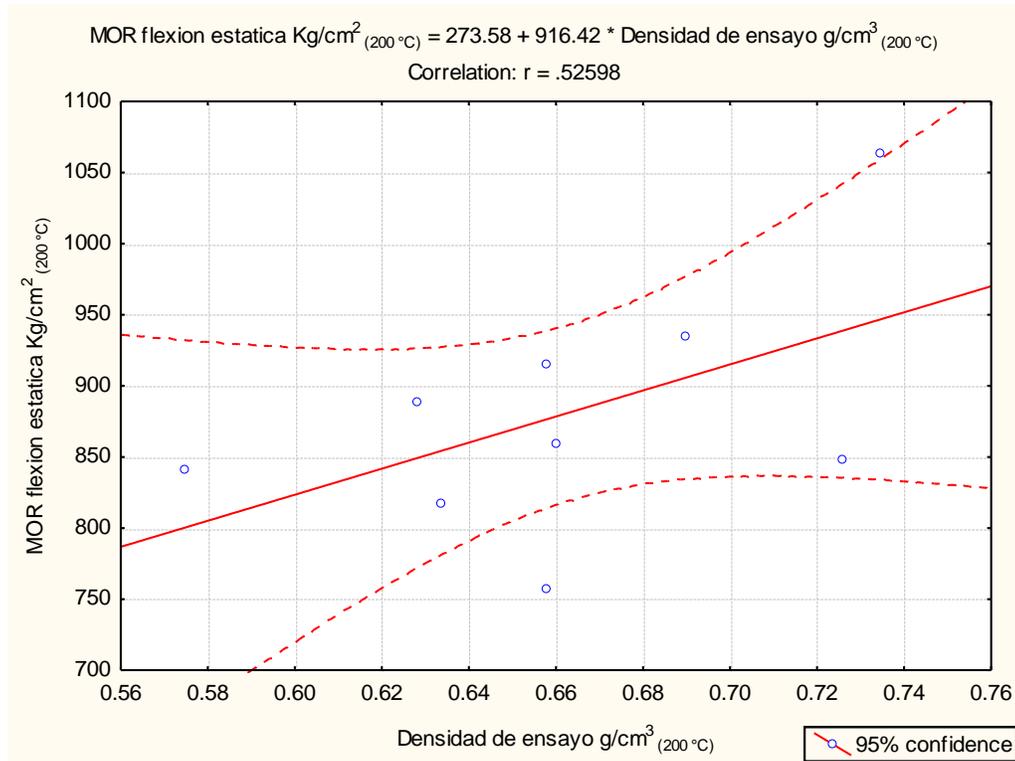


Figura 5.20 Regresión entre MOR flexión y densidad de ensayo (200 °C)

### 5.3.2 Correlación de compresión paralela y densidad aparente

Los resultados indican cierta correlación estadística en madera sin tratamiento, obteniendo un coeficiente de correlación  $r = 0.59$ , este valor no es suficiente para utilizar la ecuación de regresión. En probetas termo tratadas la relación se observa claramente fortalecida dando una fuerte correlación con probetas tratadas a 160 °C con un  $r = 0.95$  y con tratadas a 200 °C una buena correlación con un  $r = 0.75$ , esto abre la posibilidad de utilizar la ecuación de regresión para estimar valores aproximados de resistencia a compresión paralela a partir de la densidad aparente. Dichas ecuaciones así como las rectas de regresión se muestran en los gráficos de las figuras 5.21, 5.22 y 5.23.

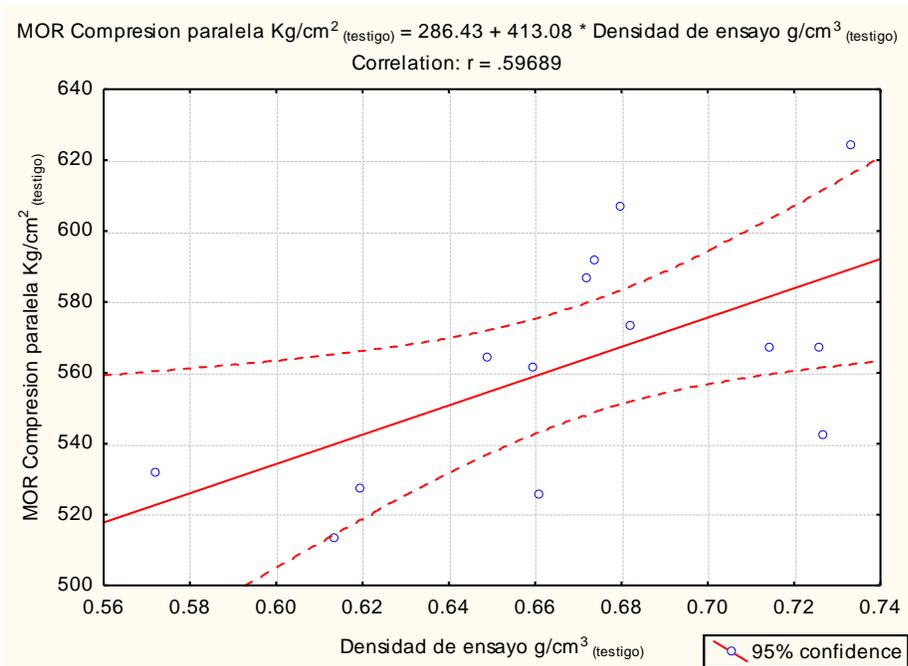


Figura 5.21 Regresión entre compresión paralela y densidad de ensayo (testigo)

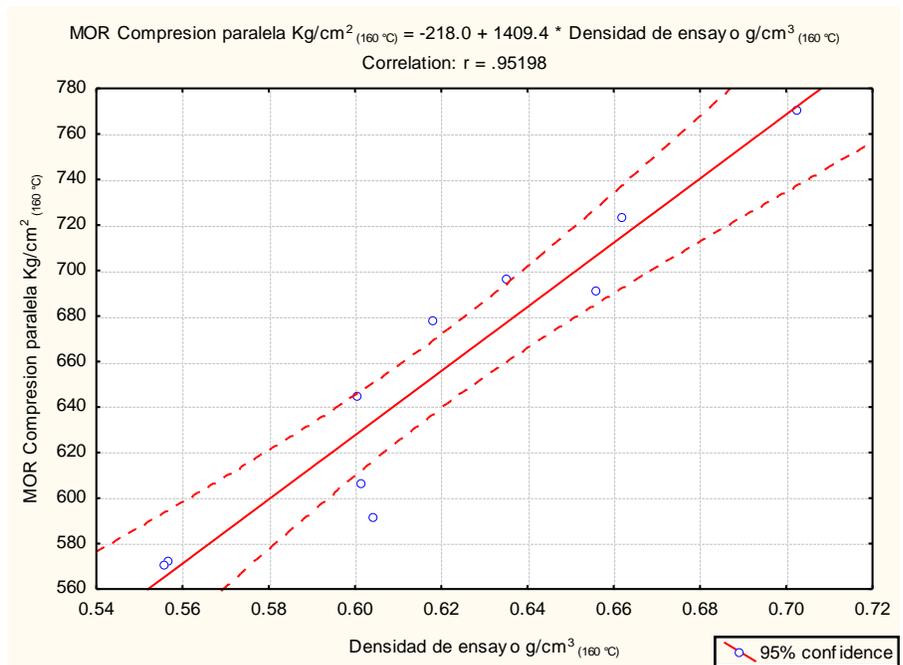


Figura 5.22 Regresión entre compresión paralela y densidad de ensayo (160 °C)

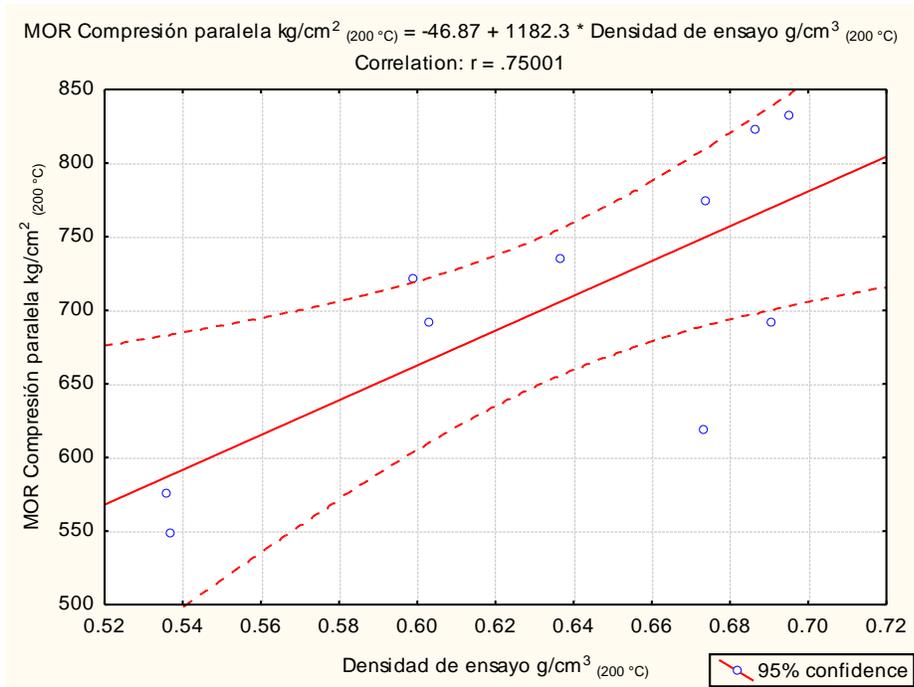


Figura 5.23 Regresión entre compresión paralela y densidad de ensayo (200 °C)

## 6. CONCLUSIONES

-El efecto del tratamiento térmico en las propiedades físicas de la madera de *Vitex gaumeri* fue positivo generalmente, disminuyendo la contracción radial y volumétrica, el hinchamiento radial, tangencial y volumétrico;

- Los efectos fueron de mayor intensidad a 200°C que a 160°C a excepción de la contracción e hinchamiento radial que presentaron mayor diferencia a 160°C que a 200°C.

- El contenido de humedad y la densidad aparente disminuyeron en la madera con tratamiento térmico al aumentar la temperatura.

- La relación de anisotropía de contracción e hinchamiento es afectada negativamente por el tratamiento debido a los cambios sufridos en el hinchamiento radial principalmente, el incremento fue significativo a 160°C.

- La dureza Janka axial aumentó en madera termo tratada mientras que en dureza lateral no se produjeron cambios.

-El tratamiento térmico a 200°C disminuyó significativamente la resistencia a la flexión estática y a la extracción de clavo en la dirección tangencial ya que se convirtió en un material más frágil. Sin embargo, a 160 y 200°C su resistencia a compresión paralela a la fibra y módulo de elasticidad en flexión se incrementaron denotando un material con mayor rigidez.

- La relación entre MOR en flexión estática y la densidad al momento del ensayo decreció en la madera con tratamiento térmico. La relación entre resistencia a compresión paralela y la densidad al momento del ensayo fue favorecida considerablemente en madera termo tratada, sobre todo a 160°C, esto abre la posibilidad de considerar el uso de la ecuación de regresión para predecir la resistencia de la madera termo tratada cuando se somete a esfuerzos de compresión, utilizando la densidad.

## 7. REFERENCIAS

- Akyildiz, M. H., & Ates, S. (2008). Effect of heat treatment on equilibrium moisture content (EMC) of some wood species in Turkey. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 4(6): 660-665.
- Alen R., R. Kotilainen & A. Zaman. (2002). Thermochemical behaviour of Norway spruce (*Picea Alba*) at 180-225°C; *Wood Science and Technology*; 36: 163-170.
- Altgen M, Adamopoulos S, Viikari J A, Hukka A, Tetri T y Militz H. (2012). Factors Influencing the Crack Formation in Thermally Modified Wood. In: Session Three: Thermal modification 1 Proceedings / *The Sixth European Conference on Wood Modification*, Ljubljana, Slovenia, (pp. 149-158).
- AFPS (American Forest & Paper Association). (2004). American Wood Council. Wood Structural Design Data. 1986 edition with 1992 Revisions.
- FTA (Finnish Thermowood Association). (2003). *ThermoWood Handbook*, c/o Wood Focus Oy, P.O. Box 284 (Snellmaninkatu 13), FIN-00171 Helsinki, Finland. 89 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (2009). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. D 143-09.
- Awoyemi, L., & Jones, I. P. (2011). Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. *Wood science and technology*, 45(2): 261-267.
- Bárcenas-Pazos, G. M., Ortega-Escalona, F., Ángeles-Álvarez, G., & Ronzón-Pérez, P. (2014). Relación estructura-propiedades de la madera de angiospermas mexicanas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 21(42).
- Bekhata, P., & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57(5): 539-546.
- Boonstra, M. J., Rijdsdijk, J. F., Sander, C., Kegel, E., Tjeerdsma, B., Militz, H., & Stevens, M. (2006). Microstructural and physical aspects of heat treated wood: part 2. hardwoods. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 8(3): 209-218.

- Boonstra, M.J; Acker, J.; Tjeerdsma, B.F., & Kegel, E. (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science* 64: 679-690.
- Borrega, M., & Kärenlampi, P. P. (2008). Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 66(1): 63-69.
- Calonego FW, Severo ETD., & Ballarin AW, (2011). Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. *Eur J Wood Prod* 70:453–460.
- Chen, Y., Gao, J., Fan, Y., Tshabalala, M. A., & Stark, N. M. (2012). Heat-induced chemical and color changes of extractive-free black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood. *BioResources*, 7(2): 2236-2248.
- Chudnoff, M. (1984). Tropical Timbers of the World. Agriculture Handbook 607. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 311 pp.
- CICY, (2013). Centro de investigación científica de Yucatán. < [www.cicy.mx](http://www.cicy.mx) >. Consultado el 27 de noviembre 2013.  
[http://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/ficha\\_virtual.php?especie=1445](http://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/ficha_virtual.php?especie=1445)
- COFAN (1994). "Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera". Comisión Forestal de América del Norte - Consejo Nacional de la Madera en la Construcción, A. C. México, D. F. 476 p.
- CONABIO, (2012). Sistemas productivos sostenibles y biodiversidad. *Informe de evaluación ambiental*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 260 p.
- Gobierno del Distrito Federal (2004). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera. Gaceta Oficial del Departamento del D.F, México. 35 p.
- Esteves, B., Marques, A. V., Domingos, I., & Pereira, H. (2008). Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*, 42(5): 369-384.
- Esteves, B.M., y Pereira, H.M. (2009). "Wood modification by heat treatment: A review," *Bioresources* 4(1): 370-404.

- Fernández-Golfín, J. I., Conde García, M., Fernández-Golfín, J. J., Hermoso, E., & Cabrero, J. C. (2014). Efecto de la temperatura de termotratamiento en el comportamiento eléctrico de la madera de pino radiata. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(1): 25-36.
- Fernández-Villegas, Robles, & Echenique-Manrique (1983). Estructuras de madera. Limusa, México. 367 p.
- FPL (2010). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory, USDA Agriculture Handbook 72 US Department of Agriculture, Washington, DC. 509 p.
- Garibay-García, G. A. & Espinoza-Herrera, R. (2014). Cambio de coloración en la madera de *Eucalyptus nitens* por efecto del termotratamiento. XI Coloquio Internacional Multidisciplinario. 2-5 Diciembre, Huetamo, Michoacán, México.
- Gerhards, C. C. (1982). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and fiber*, 14(1): 4-36.
- Gobierno del Distrito Federal (2004). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera. Gaceta Oficial del Departamento del D.F, México. 35 p.
- Grotkopp, I. (2006). Influence of Water on the Mechanical Properties of Wood Investigated Using X-ray and Neutron Scattering. Ph.D. Thesis. Kiel University Christian Albrechts.
- Gunduz, G., Aydemir, D., & Korkut, S. (2010). The effect of heat treatment on some mechanical properties and color changes of uludag fir wood. *Drying Technology*, 28(2): 249-255.
- Hermoso, P.E.; Mateo, C.R.; Cabrero, R.; J.C. & Fernandez, G.J.I. (2013). Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de *Pino radiata*. En: Actas del. VI Congreso Forestal Español.
- Hernández Maldonado, S. A. (2010). Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 384 p.
- Hernández S., J.J. & J. Cruz-de-León, (2013). Anatomía macroscópica de la madera de Ya'axnik (*Vitex gaumeri* Greenm) de 10 años de edad. Resumen del IV Congreso Mexicano de Recursos Forestales. 1-4 Octubre, Saltillo, Coahuila, México.

- Hernández S., J.J. (2014). Maquinado de la madera de *Vitex gaumeri* Greenm (Ya'axnik) procedente de Quintana Roo. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 134 p.
- Homan, W.J. & Jorissen, A.J.M. (2004). Wood modification developments. *Heron*, 49(4): 361–386.
- Inaturalist (2013). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). < [www.inaturalist.org](http://www.inaturalist.org) >. Consultado el 25 de noviembre 2013. <http://conabio.inaturalist.org/taxa/210075-Vitex-gaumeri>
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of static hardness. ISO 3350.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of radial and tangential shrinkage. ISO 4469.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of volumetric shrinkage. ISO 4858.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Determination of ultimate strength in static bending. ISO 3133.1a Ed.
- ISO (International Organization for Standardization). (1975). Testing in compression p to grain. ISO 3787.1a Ed.
- Järmsä, S., & Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood – Better durability without chemicals. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Johansson D. Morén T. (2006). The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh – und Werkstoff* 64(2):104–110
- Johansson, D. (2008). Heat Treatment of Solid Wood; Effects on Absorption, Strength and Colour. Ph.D. Thesis. Lulea University of Technology.
- Juodeikienė, I. (2013). Influence of Thermal Treatment on the Hygroscopicity and Dimensional Stability of Oak Wood. *Materials Science*, 19 (1): 51-55.
- Källander, B., & Landel, P. (2007). Effects of heat treatment of small clear wood samples on equilibrium moisture content and deformation. In *COST E 53 Conference–Quality Control for Wood and Wood Products* (pp. 63-68).

- Kamdern, D. P., Pizzi, A., & Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 60(1): 1-6.
- Kollmann, F.F.P., & Côté, W.A. (1968). Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 592 p.
- Korkut, S., & Budakçı, M. (2009). Effect of high-temperature treatment on the mechanical properties of rowan (*Sorbus aucuparia* L.) wood. *Drying Technology*, 27(11): 1240-1247.
- LeVan S.L., Ross R.J., & Winandy J.E. (1990). Effects of fire retardant chemicalson bending properties of wood at elevated temperatures, Res.Pap. FPL-RP-498 p.
- Martínez, G. M., Reyna, T. A., González, R. Á. R., Barrié, C. T. L., de la Rosa Vázquez, A., Martínez, A. M., & de la Rosa Manzano, E. (2013). Distribución de Especies Forestales de Importancia Ecológica y Económica en la Península de Yucatán. 12 p.
- Metsä-Kortelainen, S. (2011). Differences between sapwood and heartwood of thermally modified Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) under water and decay exposure. Ph. D. Thesis. University school of chemical Technology. Espoo Finland. 113 p.
- Militz H., & Tjeerdsma B. (2001). Heat treatment of wood by the Plato-process. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Mitsui, K., Murata, A., & Tolvaj, L. (2004). Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy.*Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(3): 164-168.
- Montagu, K. D., Kearney, D. E., & Smith, R. G. B. (2003). The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production—a review. *Forest Ecology and Management*, 179(1): 36 p.
- Nolan, G. B., Greaves, B., Washusen, R., Parsons, M., & Jennings, S. (2005). Eucalypt Plantations for Solid Wood Products in Australia-A Review.
- Peláez-Samaniego, M. Yadama, V. Lower, E. Espinoza-Herrera, R. (2013). A review of Wood thermal pretreatments to improve wood composite properties. *Wood Sci Technol.* 47:1285-1319.

- Pérez O., C. P.; T. F. Carmona V. & M. Rogel G. (1980). Estudio anatómico de la madera de 43 especies tropicales. Boletín Técnico No. 63. SARH. INIF. México. 276 p.
- Rapp A O., Sailer M. (2001). Oil heat treatment of wood in Germany. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Sandberg, D., & Navi, P. (2007). Introduction to thermo-hydro-mechanical (THM) wood processing. 177 p.
- Standards Australia (2010), Residential Timber Framed Construction – *Part 4: Simplified – Non-Cyclonic Areas*, AS 1684.4-2010, Standards Australia, Sydney. 205 p.
- Syrjänen, T., Kestopuu Oy (2001). Production and classification of heat treated wood in Finland. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Talavera, F. F., Guzmán, J. S., Ramírez, M. L., Richter, H. G., & Dueñas, R. S. (2002). Comportamiento higroscópico de la madera de *Persea americana* Var. *Guatemalensis* Mill. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 8(1): 49-56.
- Tamarit U., J. C. & J. L. López T. (2007). Xilotecología de los principales árboles tropicales de México. Libro Técnico No. 3. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo Experimental San Martinito. Tlahuapan, Puebla. México. 216-219 p.
- Torelli, N. (1982). Estudio promocional de 43 especies forestales mexicanas. Programa de Cooperación Científica y Técnica México-Yugoslavia. SARH. SFF. México. 73 p.
- UICN (2013). Lista Roja de Especies Amenazadas. Versión 2013.2. < [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org) >. Consultado el 21 de noviembre 2013. <http://www.iucnredlist.org/search?page=127>
- Vernois M. (2001). Heat treatment of wood in France. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Vester, H. F.M. (2005). Subproyecto Bosques, En: Pozo de la Tijera, M del C y S. Calmé. Uso y monitoreo de los recursos naturales en el Corredor Biológico Mesoamericano (áreas focales Xpujil-Zoh Laguna y Carrillo Puerto). El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Chetumal. Informe final Subproyecto Bosques SNIB-CONABIO BJ002. México D.F. 82 p.

- Voss A. (2001). Short summary of discussion on heat treatments. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- Weiland, J. J., & Guyonnet, R. (2003). Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 61(3): 216-220.
- Westwood Timber Group (2014). Westwood Heat Treated Lumber Corporation. < [www.thermotreatedwood.com](http://www.thermotreatedwood.com) >. Consultado el 15 de enero del 2014. <http://www.thermotreatedwood.com/what.html>
- Yinodotlgör, N., & Kartal, S. N. (2010). Heat modification of wood: chemical properties and resistance to mold and decay fungi. *Forest Products Journal*, 60(4): 357-361.
- Zanuncio, A. J. V., Motta, J. P., da Silveira, T. A., Farias, E. D. S., & Trugilho, P. F. (2013). Physical and colorimetric changes in *Eucalyptus grandis* wood after heat treatment. *BioResources*, 9(1), 293-302.
- Zaman, A., Alen, R., & Kotilainen, R. (2000). Thermal behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and silver birch (*Betula pendula*) at 200-230° C. *Wood and fiber science*, 32(2): 138-143.